

Simulation der Wechselwirkung von Flugzeug und Böe mit dem DLR TAU-Code

Ralf Heinrich, DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

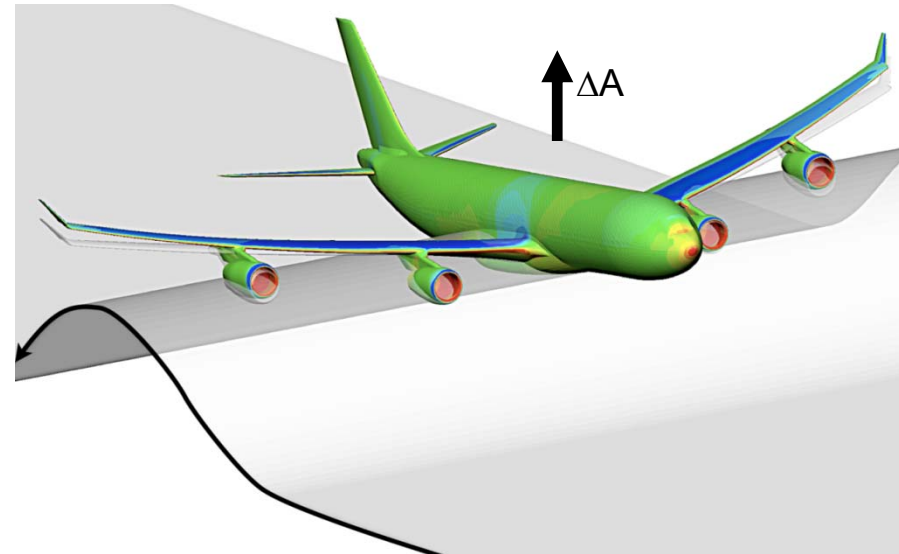
18. DGLR-Fach-Symposium der STAB
06.11. – 07.11.2012, Stuttgart



Simulation der Wechselwirkung von Flugzeug und Böe mit dem DLR TAU-Code

Übersicht

- Motivation
- Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung
 - Vereinfachte Methode: Störgeschwindigkeitsansatz
 - „Hochgenaue“ Methode: Instationäre Randbedingung
- Anwendung(en)
- Zusammenfassung und Ausblick



Motivation



Hamburg, 3. März 2008, Amateur Video
Wintersturm “Emma”





Motivation

- Wünschenswert wäre es, solche Situationen bereits vor dem Erstflug zu simulieren (virtuelle Flugversuche)
- Für den Entwurf und die Bewertung eines Flugzeuges müssen die zusätzlichen Lasten in Folge von Böen Berücksichtigung finden
 - Wichtig für die Auslegung der Struktur
 - Wichtig für die Auslegung der Steuerflächen und des Flugreglers

Ziel

- Entwicklung und Umsetzung einer Strategie zur Simulation der Wechselwirkung eines Flugzeuges mit Böen basierend auf dem CFD Löser TAU
- Die Reaktion des Flugzeuges auf die Böe soll durch Kopplung zu den relevanten Disziplinen Berücksichtigung finden



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

- Es existierte keine Möglichkeit zur Simulation von Böen in TAU

Möglicher Ausweg:

- Implementierung einer instationären Randbedingung

Diskretisiertes Strömungsfeld



$t=t_0$

Am Rand werden zusätzliche Einströmgeschwindigkeiten vorgegeben



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

- Es existierte keine Möglichkeit zur Simulation von Böen in TAU

Möglicher Ausweg:

- Implementierung einer instationären Randbedingung

Diskretisiertes Strömungsfeld



$t=t_1$

Am Rand werden zusätzliche Einströmgeschwindigkeiten vorgegeben



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

- Es existierte keine Möglichkeit zur Simulation von Böen in TAU

Möglicher Ausweg:

- Implementierung einer instationären Randbedingung

Diskretisiertes Strömungsfeld



$t=t_2$

Am Rand werden zusätzliche Einströmgeschwindigkeiten vorgegeben



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

- Es existierte keine Möglichkeit zur Simulation von Böen in TAU

Möglicher Ausweg:

- Implementierung einer instationären Randbedingung

Diskretisiertes Strömungsfeld



$t=t_3$

Am Rand werden zusätzliche Einströmgeschwindigkeiten vorgegeben



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

- Es existierte keine Möglichkeit zur Simulation von Böen in TAU

Möglicher Ausweg:

- Implementierung einer instationären Randbedingung

Diskretisiertes Strömungsfeld



$t=t_4$

Am Rand werden zusätzliche Einströmgeschwindigkeiten vorgegeben



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

- Es existierte keine Möglichkeit zur Simulation von Böen in TAU

Möglicher Ausweg:

- Implementierung einer instationären Randbedingung

Vorteil:

- Erfassen der wechselseitigen Interaktion

Nachteil

- Erfordert eine hohe räumliche Auflösung im gesamten Strömungsfeld, um die Böe ohne große numerische Verluste zu transportieren



Sehr teuer . . .

Gibt es Alternativen??



$t=t_4$

Am Rand werden zusätzliche Einströmgeschwindigkeiten vorgegeben



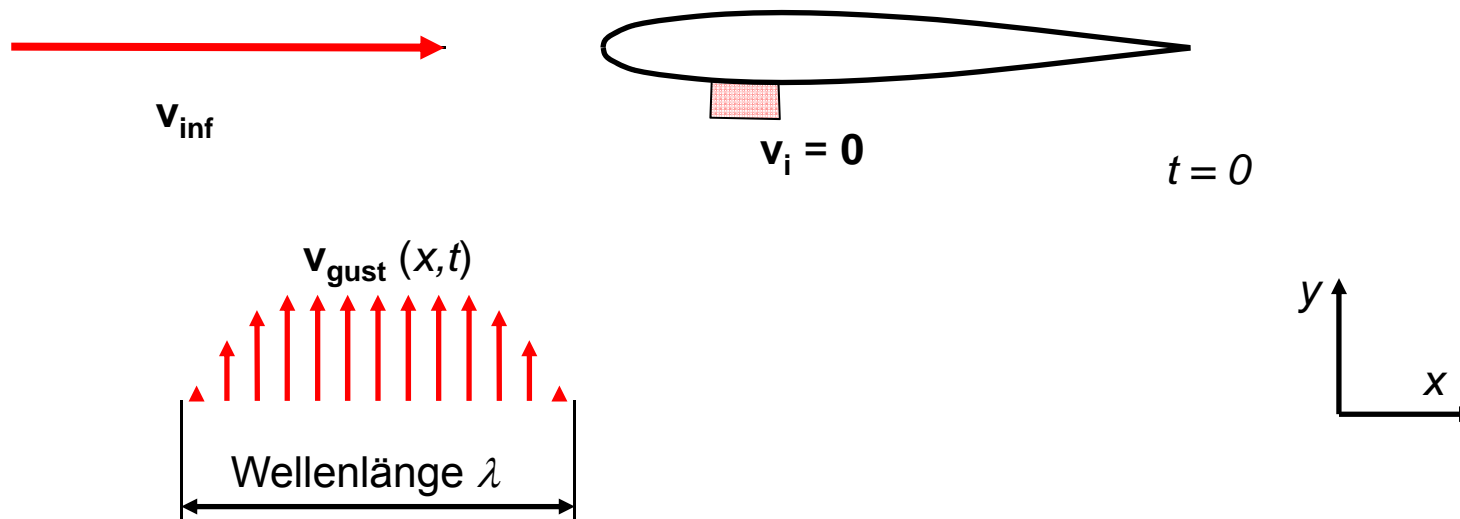
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

- Ein in der Literatur verbreiteter Ansatz ist der sogenannte Störgeschwindigkeitsansatz *

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \oint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_B - \vec{v}_i) \cdot d\vec{S} = 0$$

Zusätzliche Störgeschwindigkeit induziert z.B. durch Böen, die als Funktion von Raum und Zeit vorgegeben werden kann



*) Wird auch manchmal als *Field-Velocity-Approach* oder *Artificial-Velocity-Approach* bezeichnet



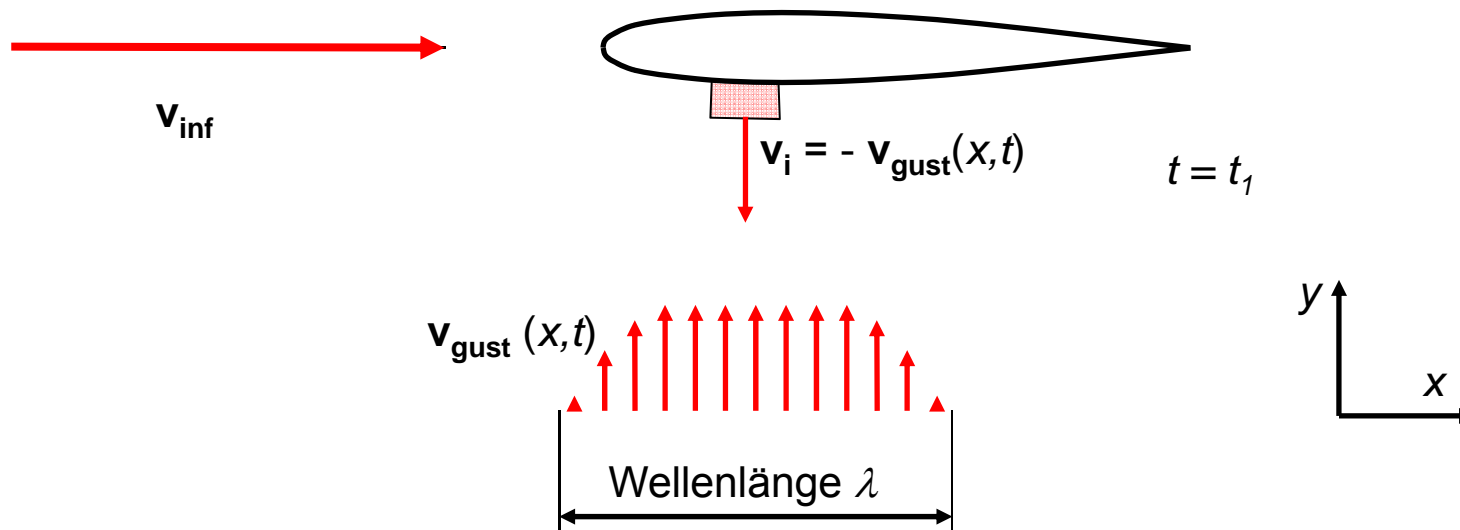
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

- Ein in der Literatur verbreiteter Ansatz ist der sogenannte Störgeschwindigkeitsansatz *

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \oint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_B - \vec{v}_i) \cdot d\vec{S} = 0$$

Zusätzliche Störgeschwindigkeit induziert z.B. durch Böen, die als Funktion von Raum und Zeit vorgegeben werden kann



*) Wird auch manchmal als *Field-Velocity-Approach* oder *Artificial-Velocity-Approach* bezeichnet



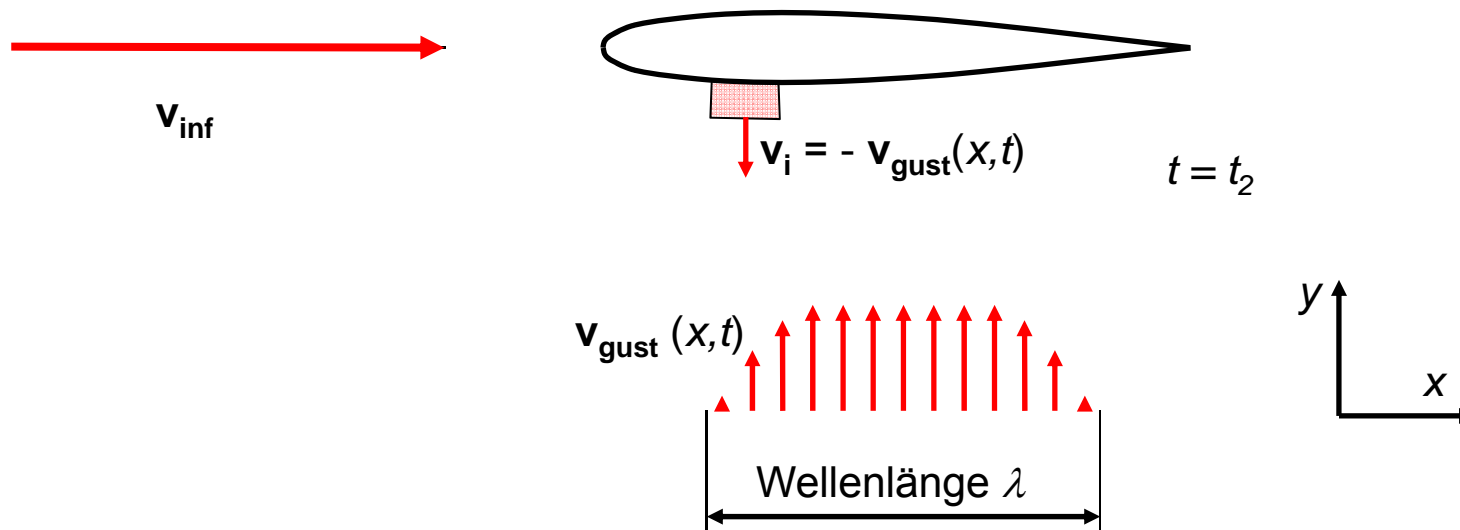
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

- Ein in der Literatur verbreiteter Ansatz ist der sogenannte Störgeschwindigkeitsansatz *

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \oint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_B - \vec{v}_i) \cdot d\vec{S} = 0$$

Zusätzliche Störgeschwindigkeit induziert z.B. durch Böen, die als Funktion von Raum und Zeit vorgegeben werden kann



*) Wird auch manchmal als *Field-Velocity-Approach* oder *Artificial-Velocity-Approach* bezeichnet



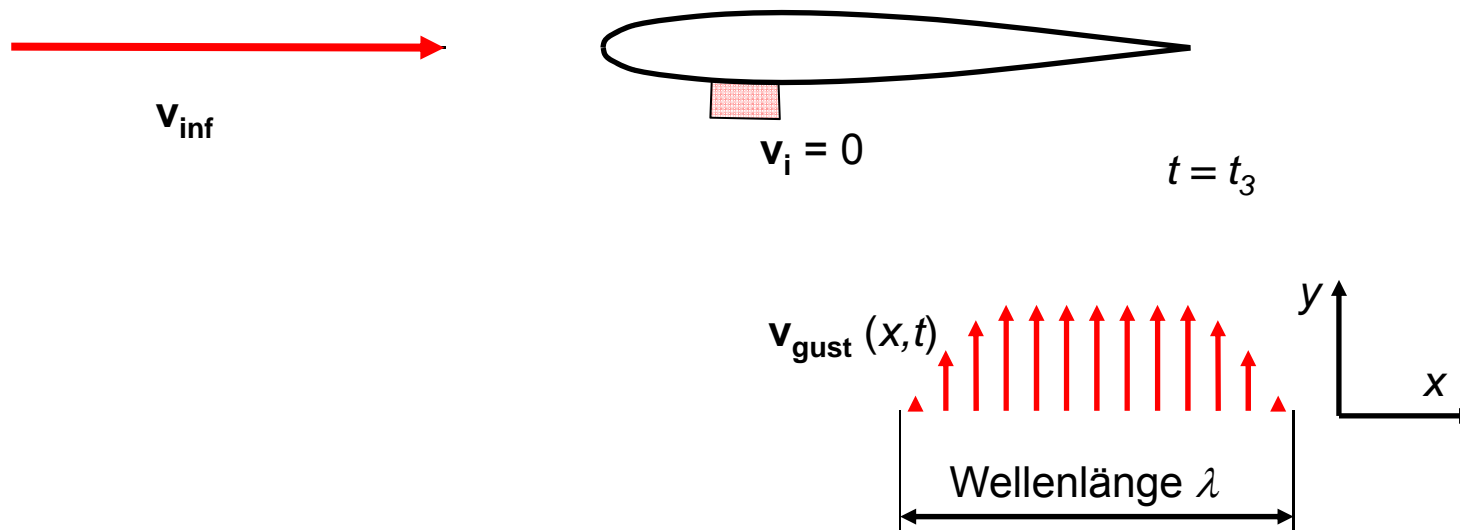
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

- Ein in der Literatur verbreiteter Ansatz ist der sogenannte Störgeschwindigkeitsansatz *

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \oint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_B - \vec{v}_i) \cdot d\vec{S} = 0$$

Zusätzliche Störgeschwindigkeit induziert z.B. durch Böen, die als Funktion von Raum und Zeit vorgegeben werden kann



*) Wird auch manchmal als *Field-Velocity-Approach* oder *Artificial-Velocity-Approach* bezeichnet



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

- Ein in der Literatur verbreiteter Ansatz ist der sogenannte Störgeschwindigkeitsansatz *

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \oint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_B - \vec{v}_i) \cdot d\vec{S} = 0$$

Zusätzliche Störgeschwindigkeit induziert z.B. durch Böen, die als Funktion von Raum und Zeit vorgegeben werden kann

- Vorteil: Leicht zu implementieren und es können Standard-Gitter verwendet werden
- Nachteil: Berücksichtigt zwar den Einfluss der Böe auf das Flugzeug, nicht aber die Rückwirkung des Flugzeuges auf die Böe! → Fehler bei kleineren Böen-Wellenlängen sind zu erwarten
- Gute Erfahrungen für die Nutzung des Störgeschwindigkeitsansatzes im EU Projekt WAVENC (Flugzeug in Wirbelschleppe eines voreilenden Flugzeuges)
 - Implementierung des Störgeschwindigkeitsansatzes in TAU
 - Implementierung der instationären RB, um den Störgeschwindigkeitsansatz besser bewerten zu können

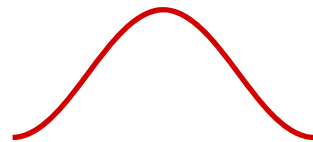
*) Wird auch manchmal als *Field-Velocity-Approach* oder *Artificial-Velocity-Approach* bezeichnet



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

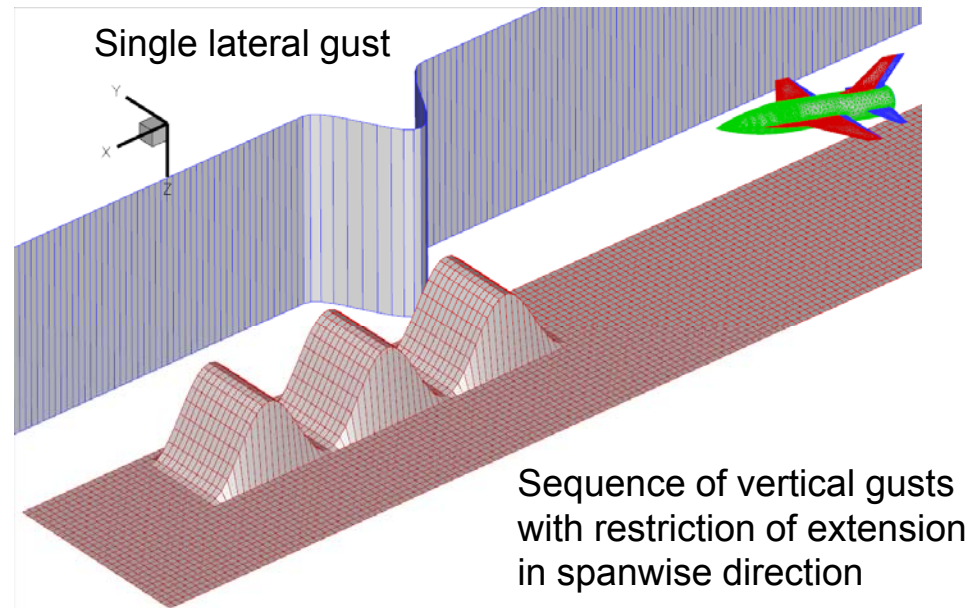
- Neben Vertikal-Böen können in TAU auch Lateral-Böen spezifiziert werden
- Input Parameter sind die Amplitude und die Wellenlänge
- Einzelne oder Sequenzen von Böen
- Restriktion von Böen z.B. in spannweite Richtungen
- „1-cos“ oder „Kasten“-Böen



„1-cos“ Böe (FAR Part 25.341)



„Kasten“ Böe

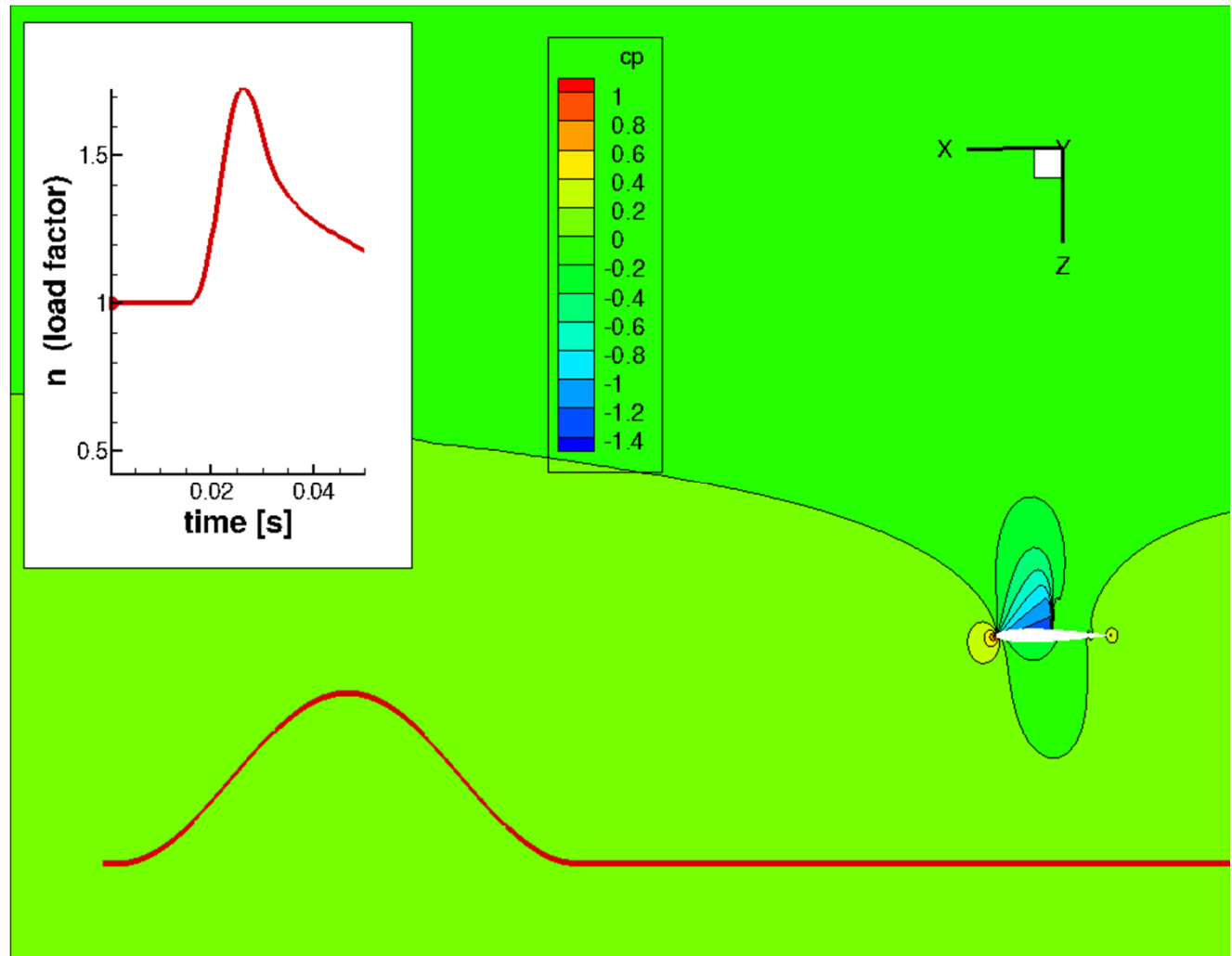


Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

Verifikation

- Interaktion eines Profils mit Vertikal-Böe
- $Ma = 0.755$
- $\alpha = 2.0^\circ$
- $\lambda_{Gust} = 4m$
- $v_{Gust} = 20m/s$
- „1-cos“ Form

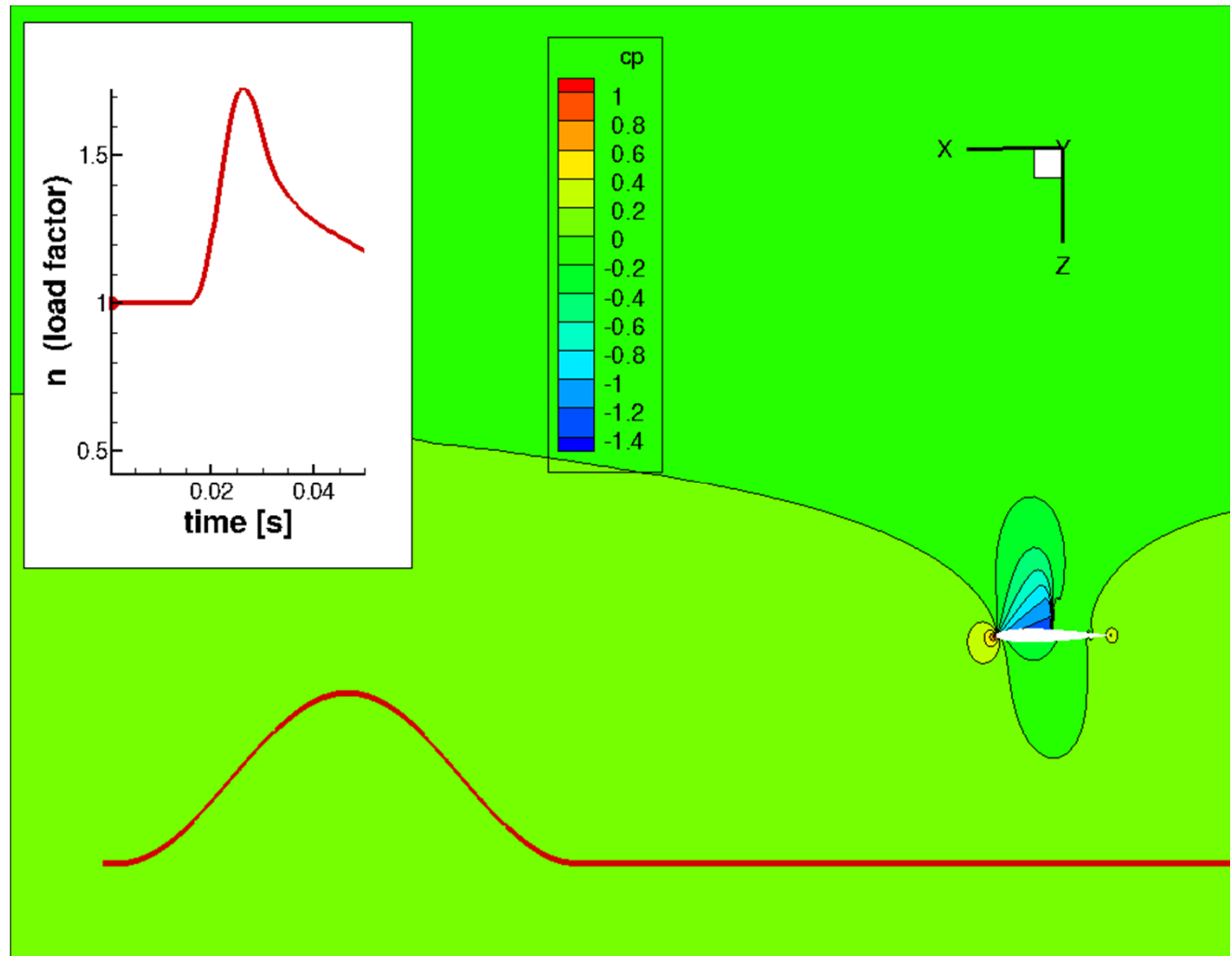


Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

Verifikation

- Interaktion eines Profils mit Vertikal-Böe
- $Ma = 0.755$
- $\alpha = 2.0^\circ$
- $\lambda_{Gust} = 4m$
- $C_{ref} = 1m$
- $V_{Gust} = 20m/s$
- „1-cos“ Form

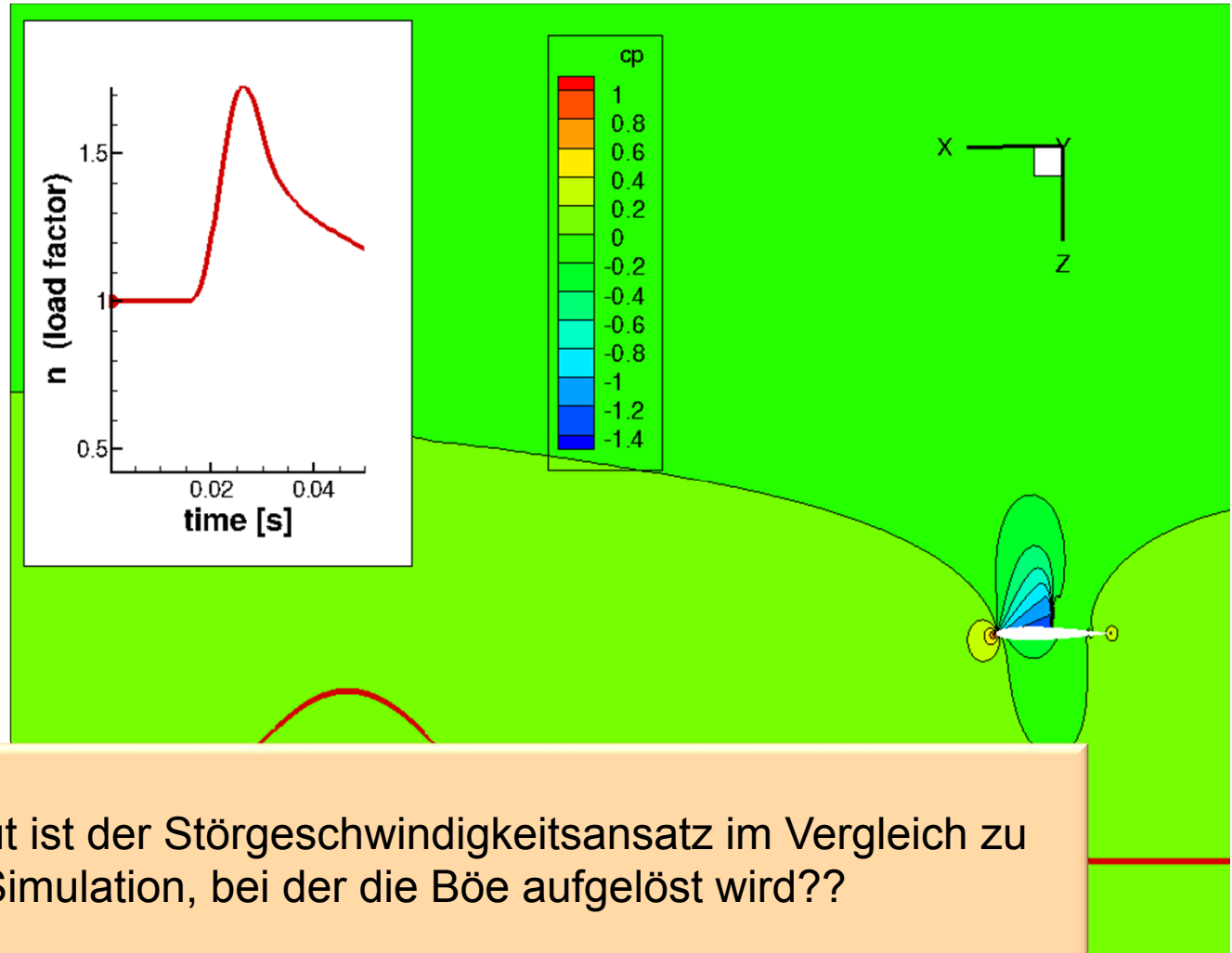


Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Störgeschwindigkeitsansatz

Verifikation

- Interaktion eines Profils mit Vertikal-Böe
- $Ma = 0.755$
- $\alpha = 2.0^\circ$
- $\lambda_{Gust} = 4m$
- $C_{ref} = 1m$
- $V_{Gust} = 20m/s$
- „1-cos“ Form



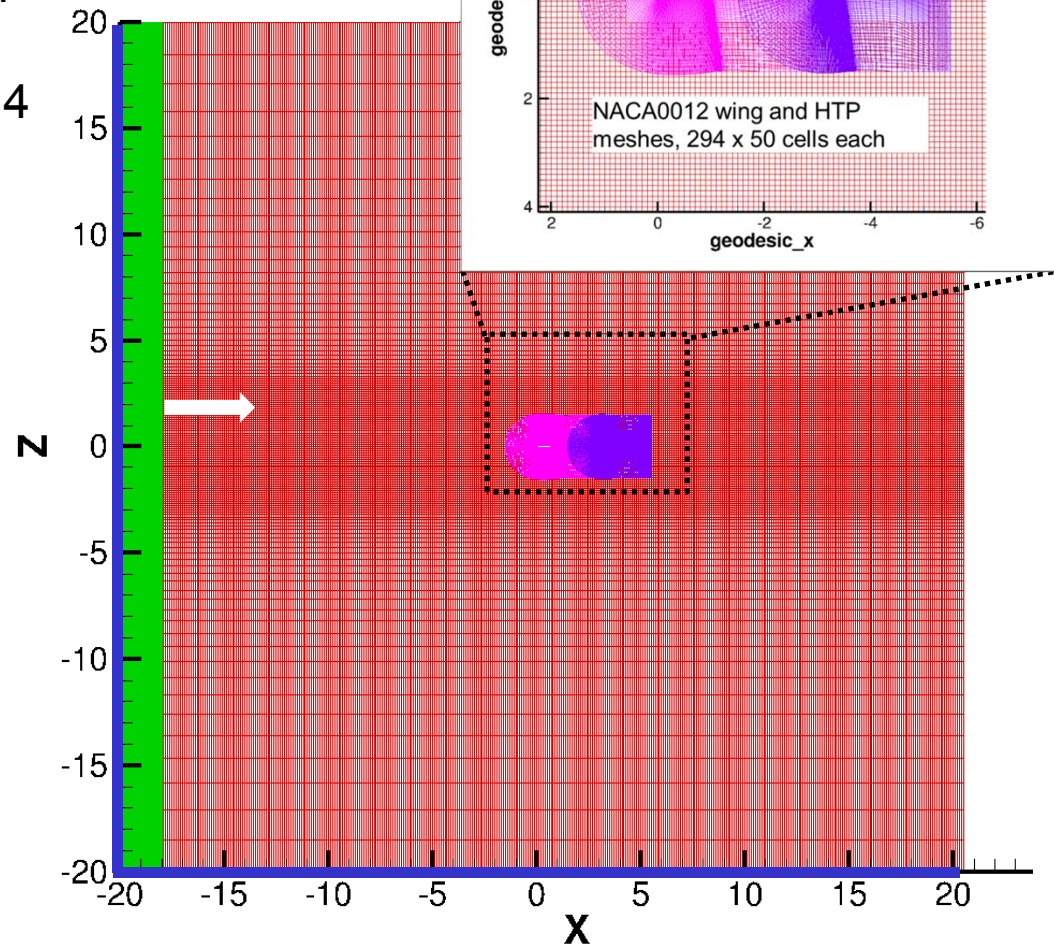
Wie gut ist der Störgeschwindigkeitsansatz im Vergleich zu einer Simulation, bei der die Böe aufgelöst wird??

Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

Testfall für die Evaluierung /
Vergleich beider Methoden

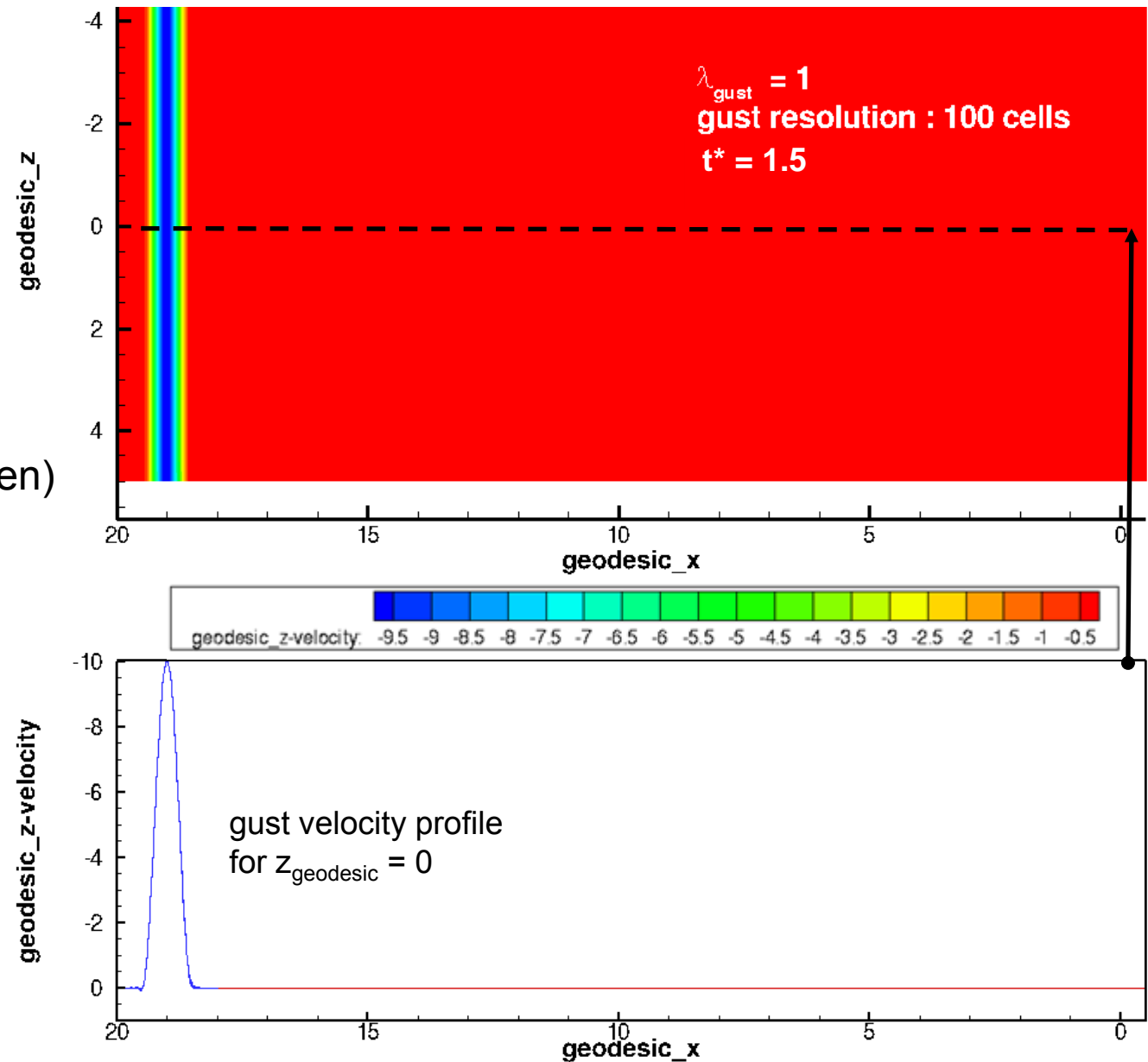
- 2D Flügel-Leitwerks-Konfiguration, eingebettet in ein Kartesisches Netz
- Variation von $\lambda_{\text{gust}} / c_{\text{ref}} = 1 / 2 / 4$
- Zusätzlichen Gitters, zum „Transport“ der Böe um Gitterpunkte zu sparen
- Instationäre RB
- $t = 0.0$: Böe befindet sich unmittelbar vor dem Gitter
- **Fragestellung:** Erforderliche Auflösung zum Transport der Böe über 20 GE



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

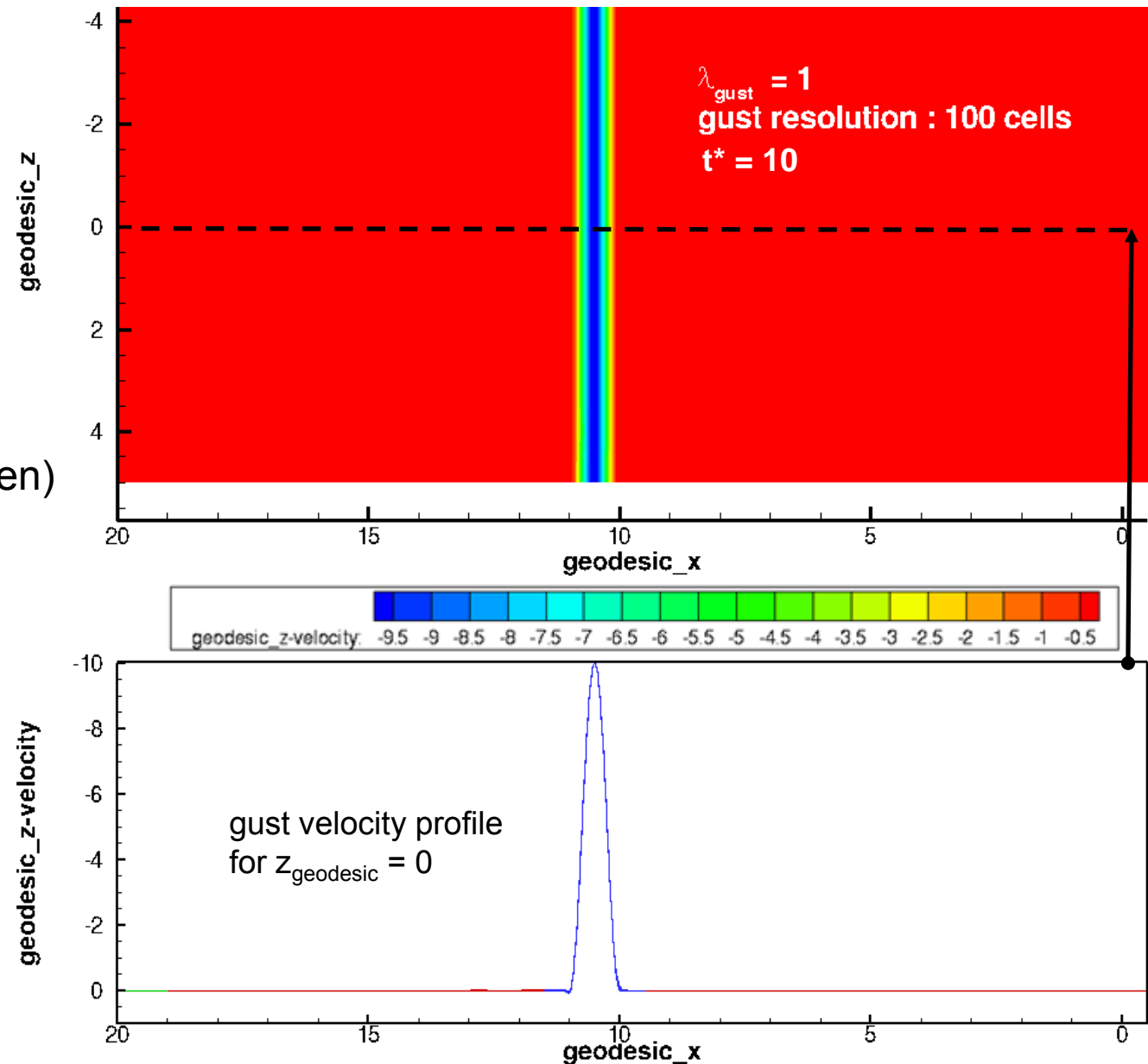
- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Hohe
Auflösung (100 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

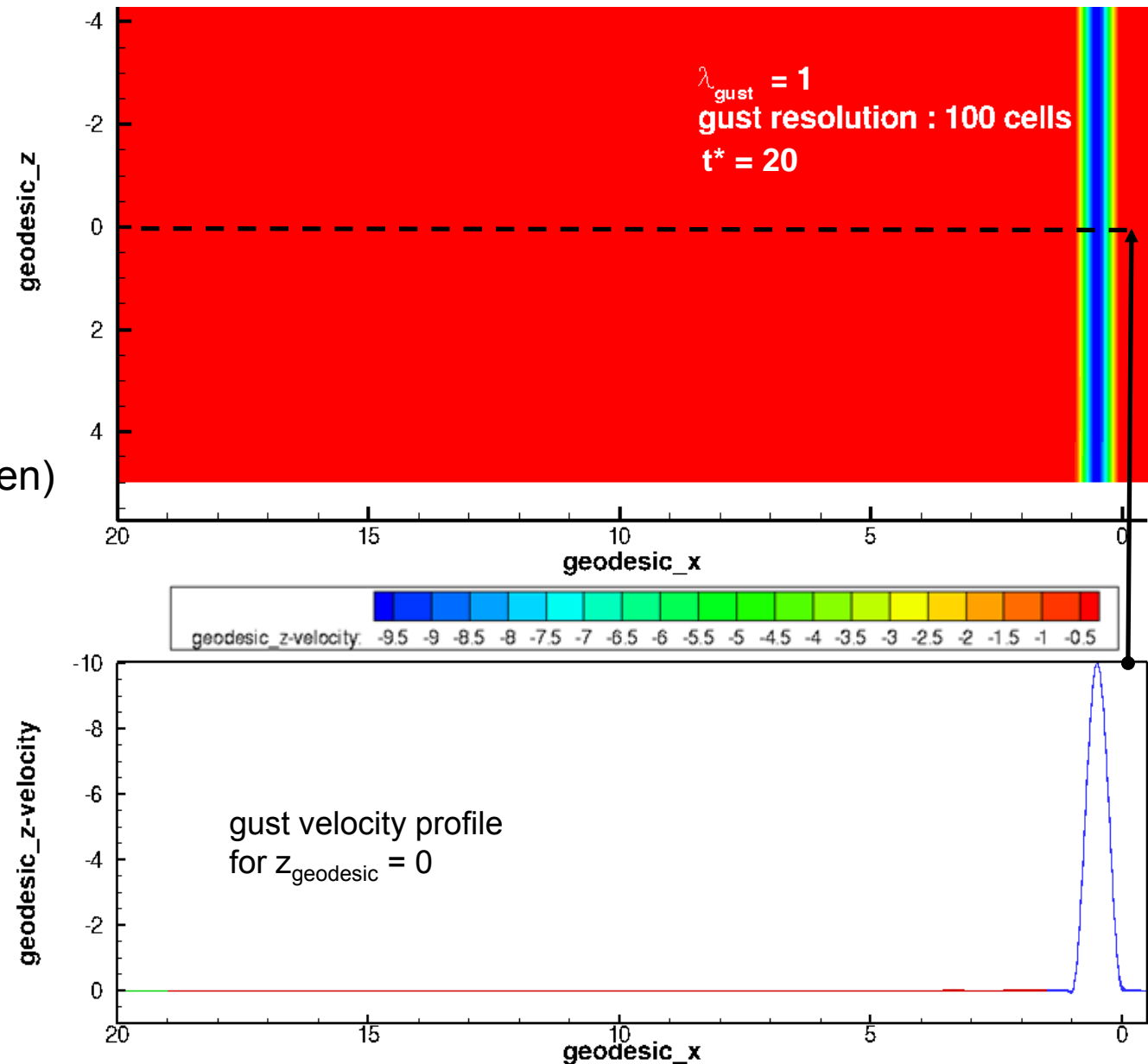
- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Hohe
Auflösung (100 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

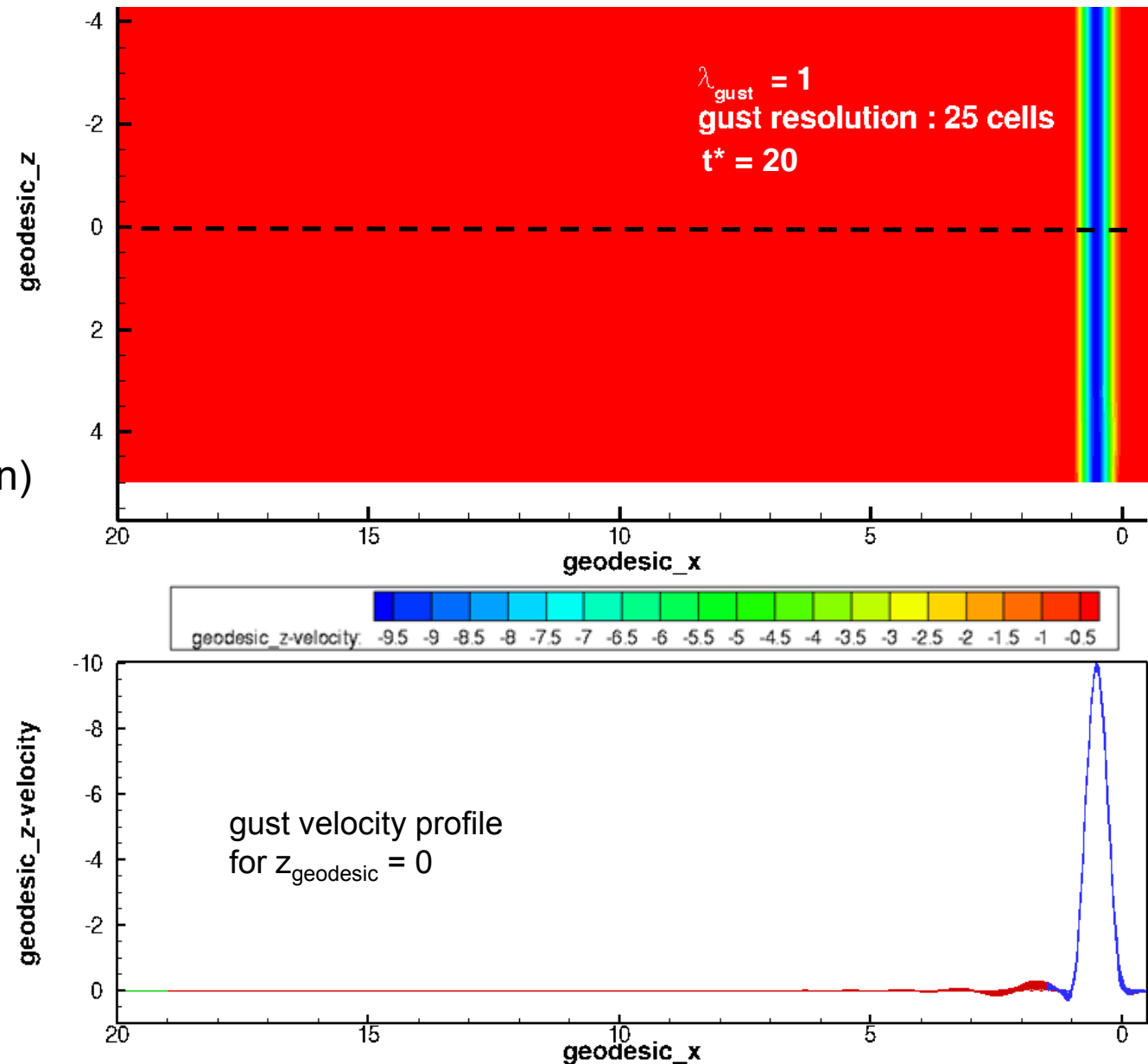
- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Hohe
Auflösung (100 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Niedrige
Auflösung (25 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$



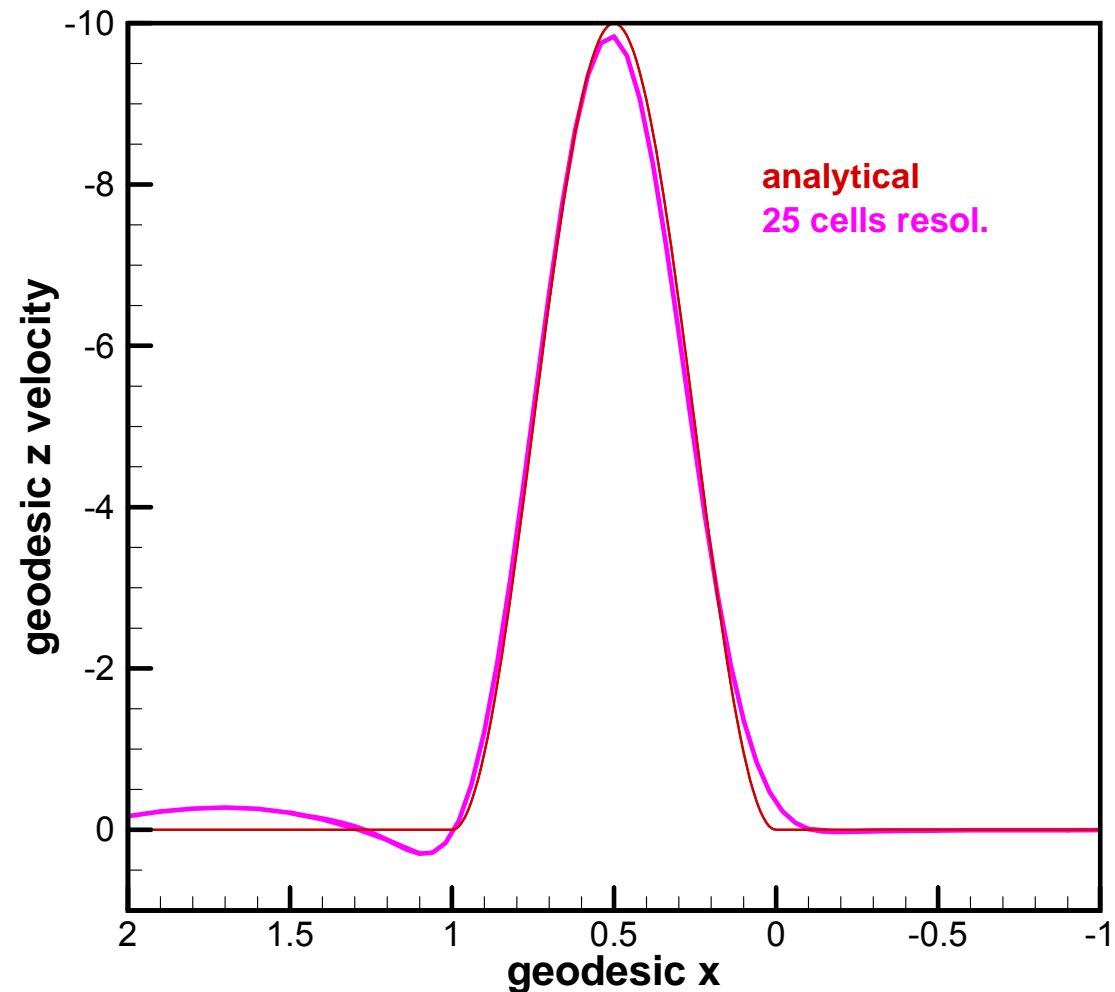
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Niedrige Auflösung (25 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$
- Böen-Profil in der Mitte des Strömungsfeldes (Höhe Profil)



Gust shape for $t^* = 20$



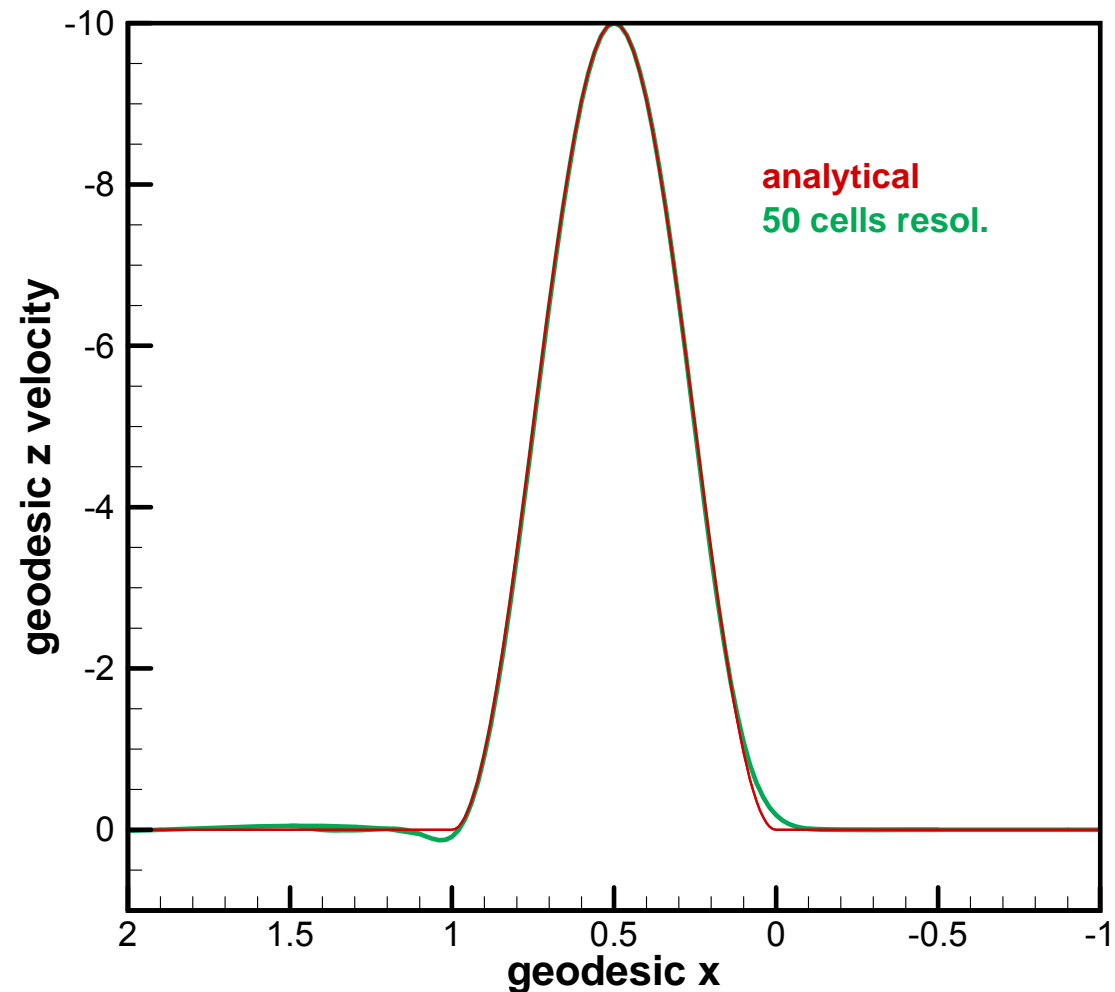
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Niedrige Auflösung (50 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$
- Böen-Profil in der Mitte des Strömungsfeldes (Höhe Profil)



Gust shape for $t^* = 20$



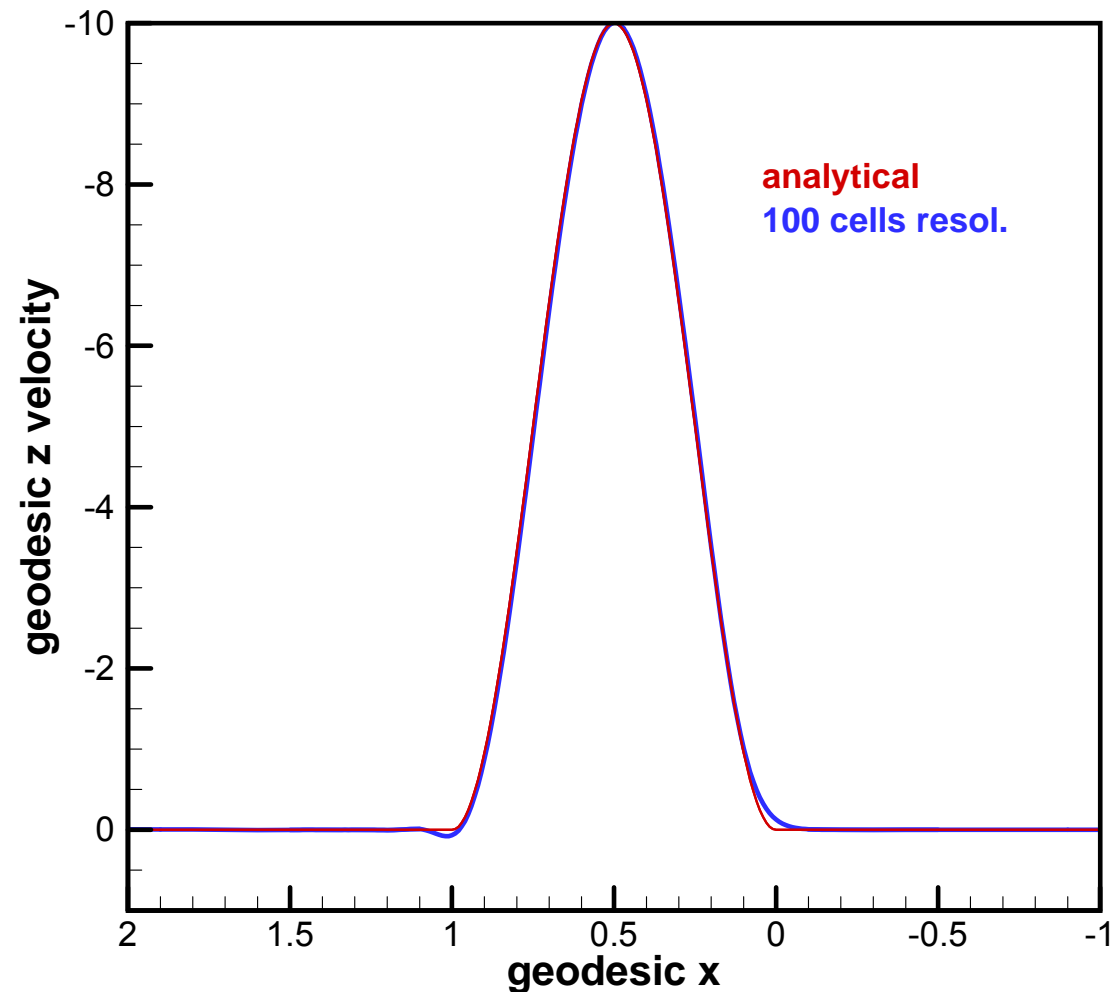
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Niedrige Auflösung (100 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$
- Böen-Profil in der Mitte des Strömungsfeldes (Höhe Profil)



Gust shape for $t^* = 20$



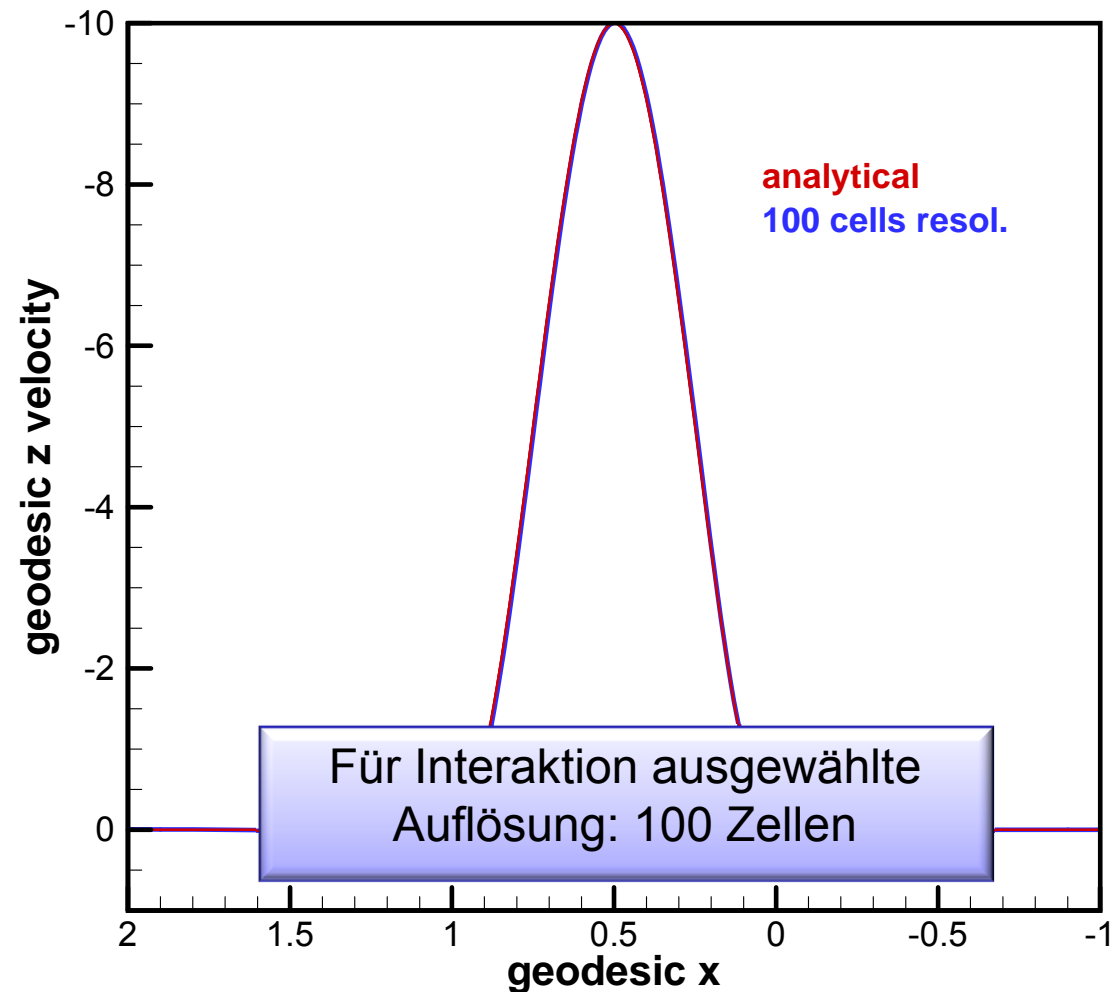
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

- $\lambda_{\text{gust}} = 1 \text{ GE}$
- $t^* = t / t_{\text{ref}}$
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\infty}$
- Niedrige Auflösung (100 Zellen)
- $\Delta t^* = 0.01$
- Böen-Profil in der Mitte des Strömungsfeldes (Höhe Profil)



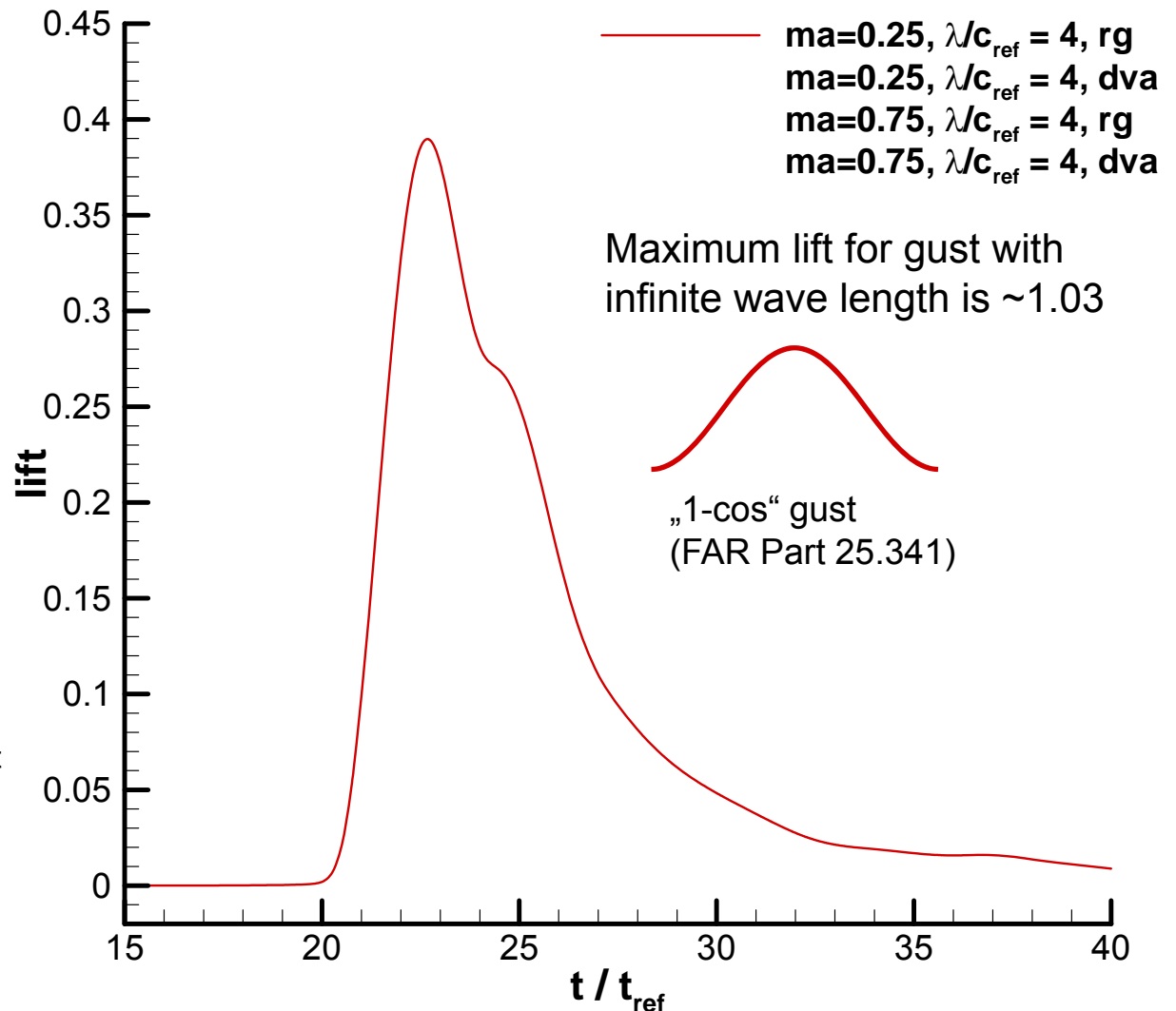
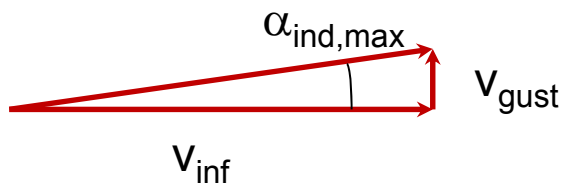
Gust shape for $t^* = 20$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

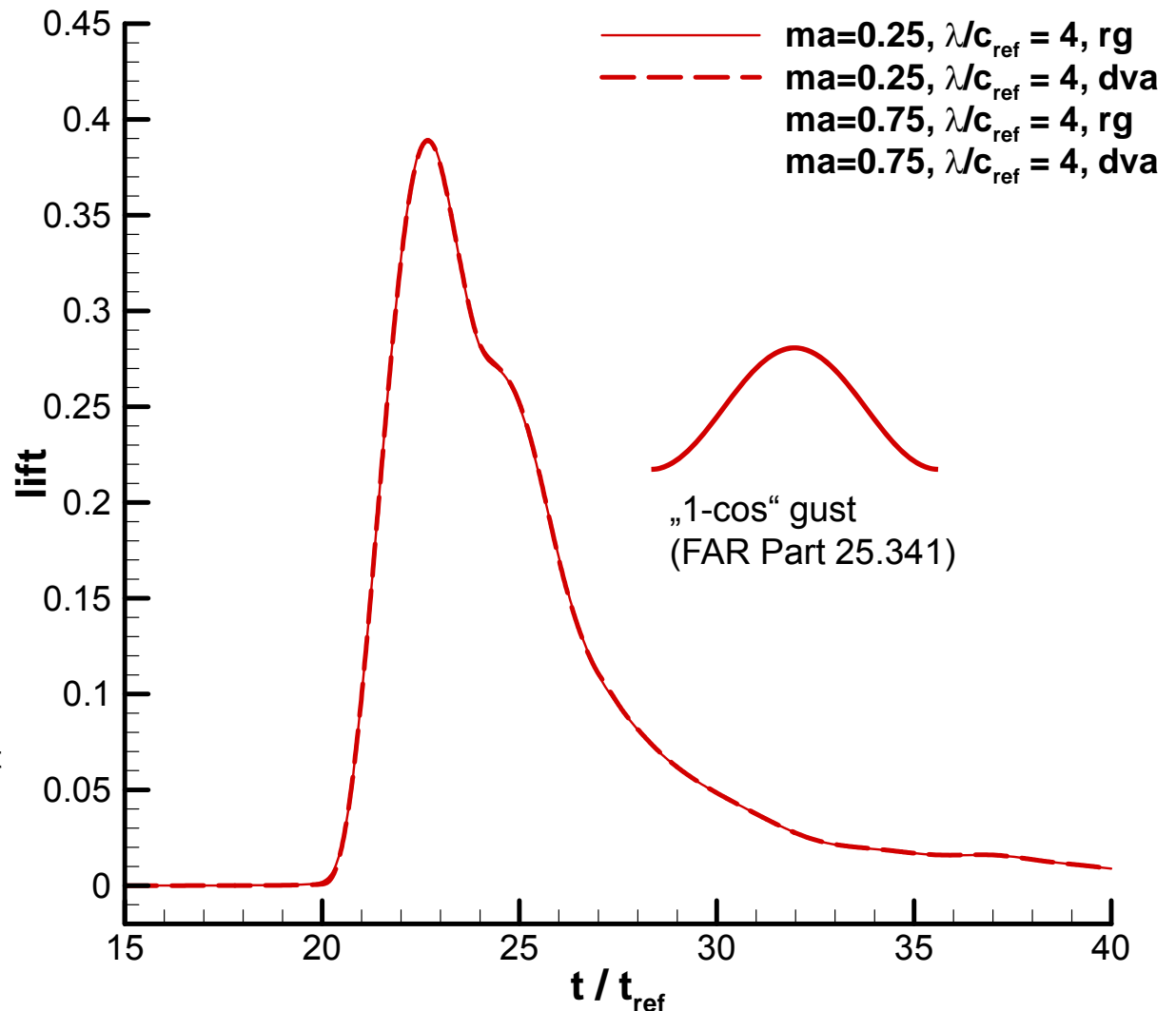
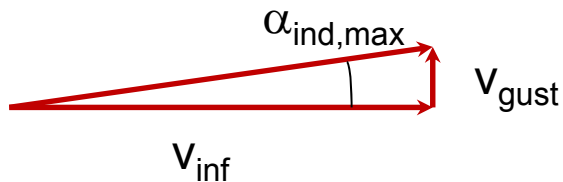
- $Ma = 0.25$
- $\alpha = 0.0^\circ$
- $\lambda_{gust} / c_{ref} = 4$
- $v_{gust} / v_{inf} = 0.1$
- $\alpha_{ind,max} = 5.71^\circ$
- „1-cos“ Form
- $t_{ref} = c_{ref} / v_{inf}$
- $\Delta t / t_{ref} = 0.01$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

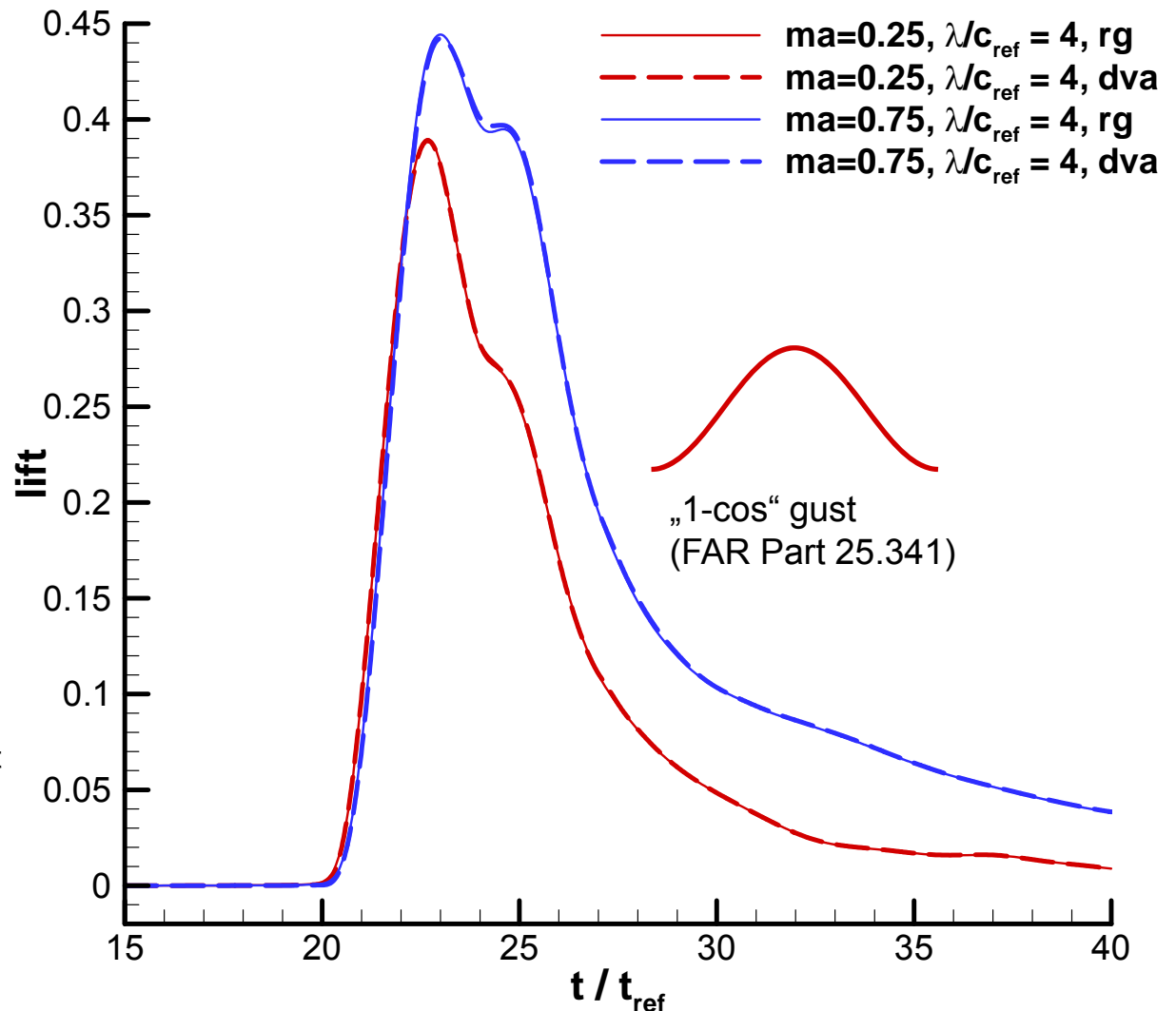
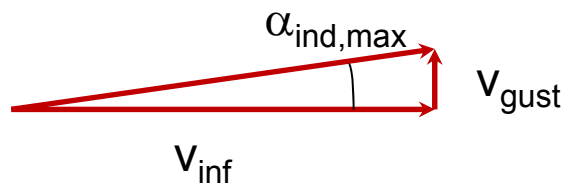
- $Ma = 0.25$
- $\alpha = 0.0^\circ$
- $\lambda_{gust} / c_{ref} = 4$
- $v_{gust} / v_{inf} = 0.1$
- $\alpha_{ind,max} = 5.71^\circ$
- „1-cos“ Form
- $t_{ref} = c_{ref} / v_{inf}$
- $\Delta t / t_{ref} = 0.01$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

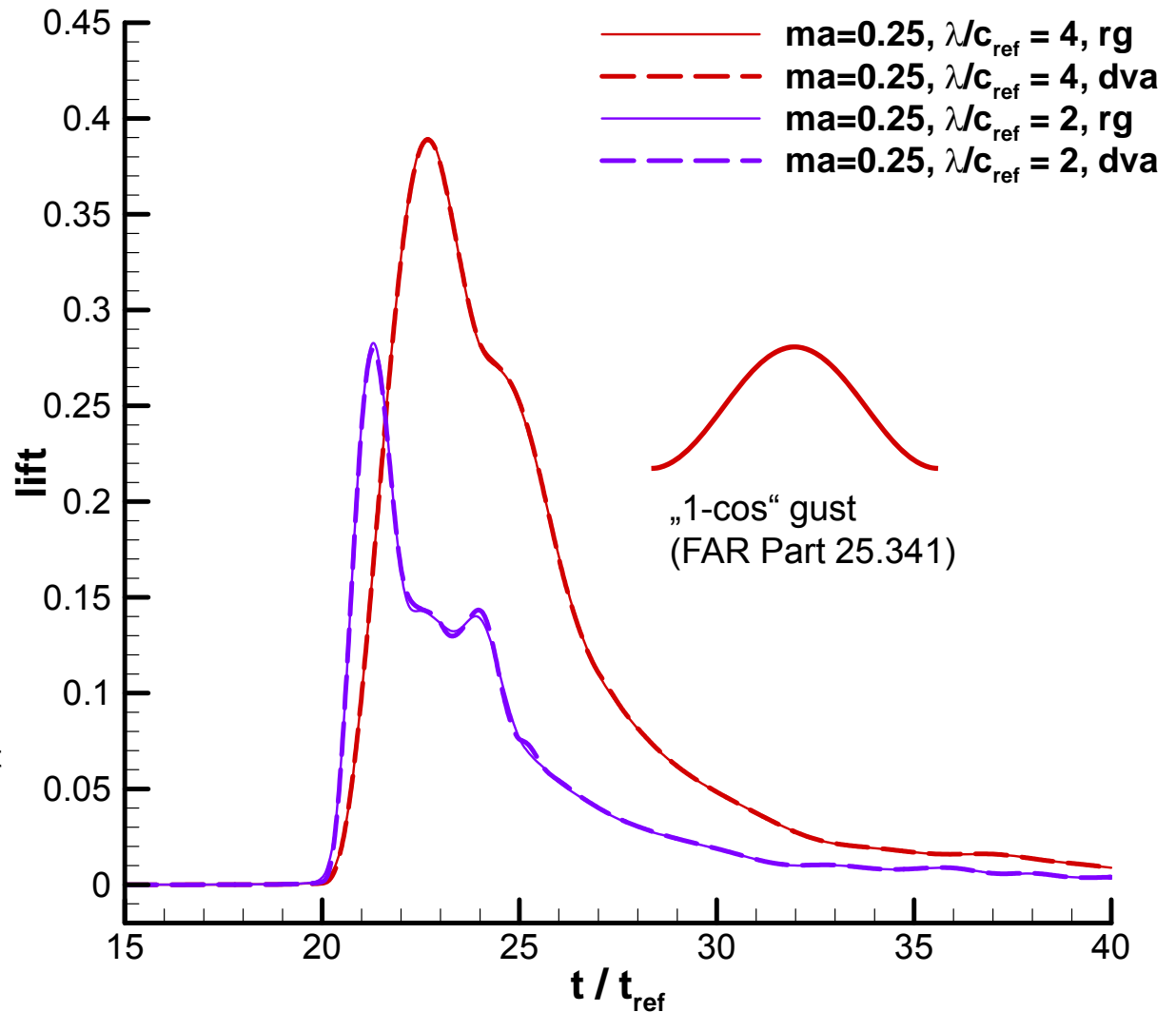
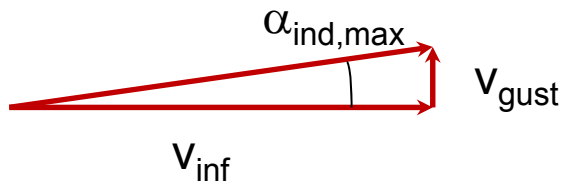
- $Ma = 0.25 \text{ \& } 0.75$
- $\alpha = 0.0^\circ$
- $\lambda_{gust} / c_{ref} = 4$
- $v_{gust} / v_{inf} = 0.1$
- $\alpha_{ind,max} = 5.71^\circ$
- „1-cos“ Form
- $t_{ref} = c_{ref} / v_{inf}$
- $\Delta t / t_{ref} = 0.01$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

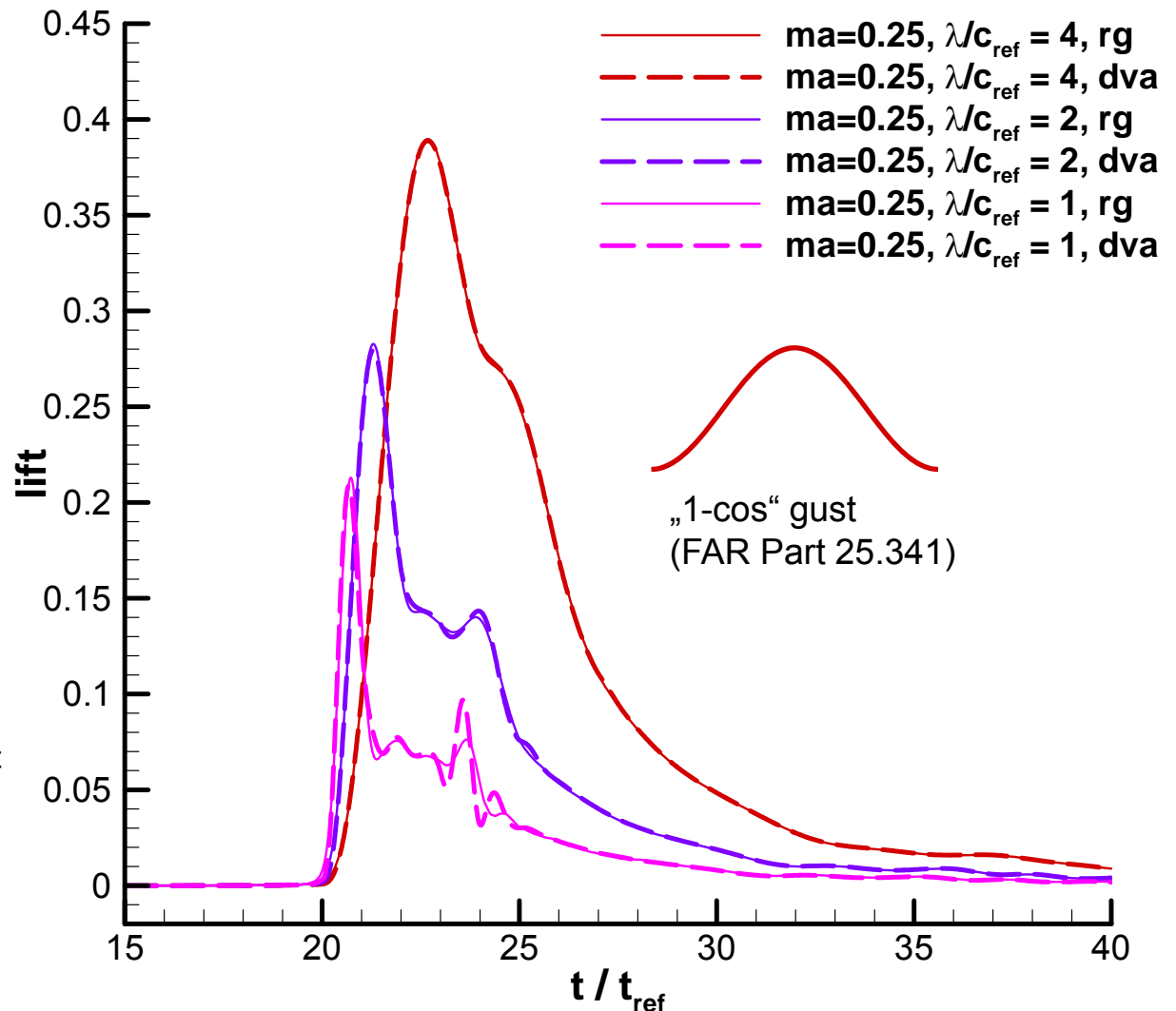
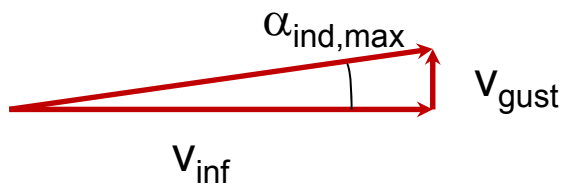
- $Ma = 0.25$
- $\alpha = 0.0^\circ$
- $\lambda_{gust} / c_{ref} = 4 \text{ \& } 2$
- $v_{gust} / v_{inf} = 0.1$
- $\alpha_{ind,max} = 5.71^\circ$
- „1-cos“ Form
- $t_{ref} = c_{ref} / v_{inf}$
- $\Delta t / t_{ref} = 0.01$



Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

- $Ma = 0.25$
- $\alpha = 0.0^\circ$
- $\lambda_{gust} / c_{ref} = 4 \text{ \& } 2 \text{ \& } 1$
- $v_{gust} / v_{inf} = 0.1$
- $\alpha_{ind,max} = 5.71^\circ$
- „1-cos“ Form
- $t_{ref} = c_{ref} / v_{inf}$
- $\Delta t / t_{ref} = 0.01$



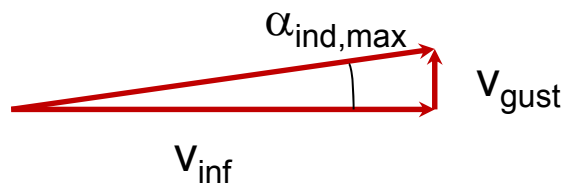
Erweiterung von TAU zur Böen-Modellierung

Vergleich Störgeschwindigkeitsansatz und hochgenauer Ansatz

- $Ma = 0.25 \text{ \& } 0.75$
- $\alpha = 0.0^\circ$
- $\lambda_{\text{gust}} / c_{\text{ref}} = 1 \text{ \& } 2 \text{ \& } 4$
- $v_{\text{gust}} / v_{\text{inf}} = 0.1$
- $\alpha_{\text{ind,max}} = 5.71^\circ$
- „1-cos“ Form
- $t_{\text{ref}} = c_{\text{ref}} / v_{\text{inf}}$
- $\Delta t / t_{\text{ref}} = 0.01$

	Differenz (%)	
λ / c_{ref}	Ma = 0.25	Ma = 0.75
1	1,96%	10,69%
2	1,17%	2,72%
4	0,21%	0,40%

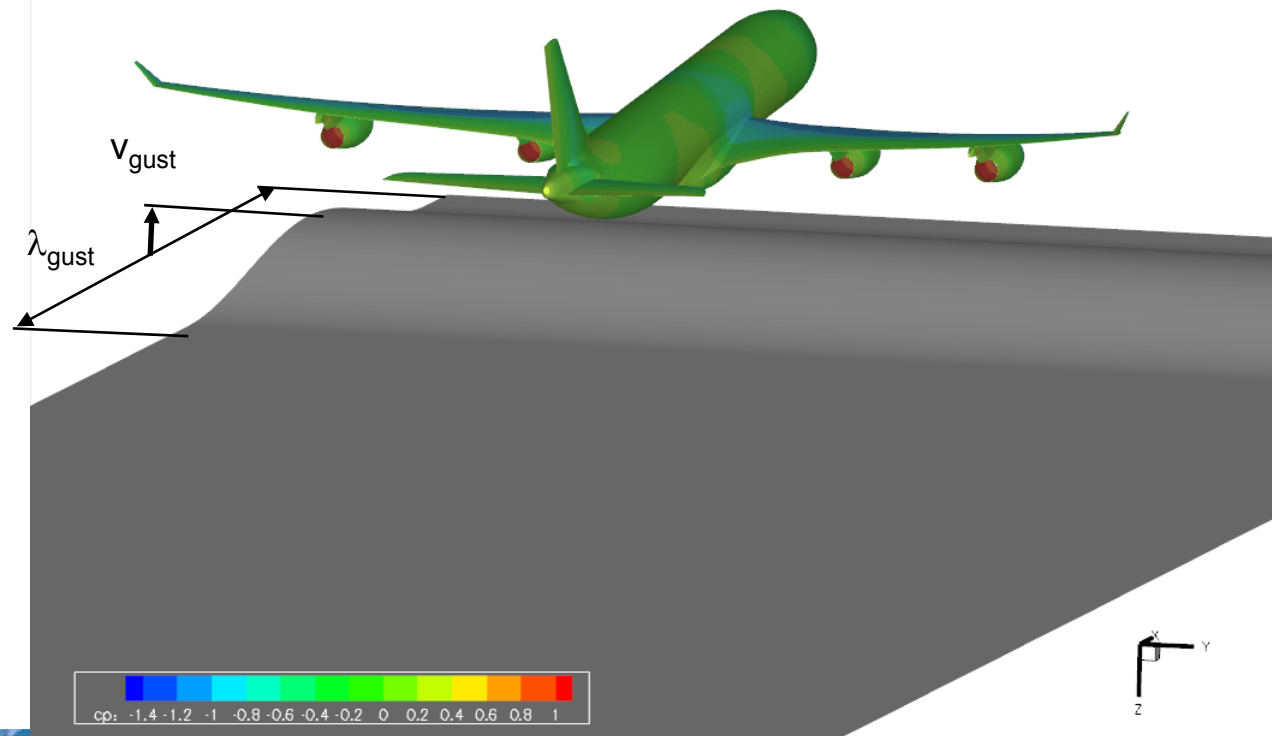
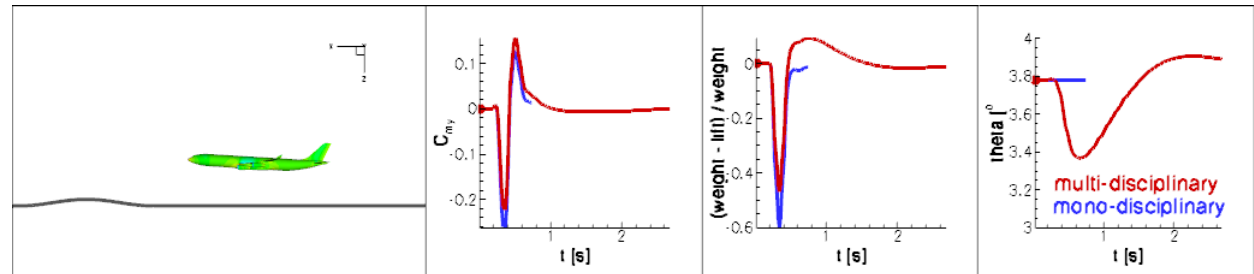
$$\text{Differenz} = \left| \frac{c_{L,\text{max},rg} - c_{L,\text{max},dva}}{c_{L,\text{max},rg}} \right|$$



Anwendung

Böen-Begegnung einer A340 Reiseflugkonfiguration

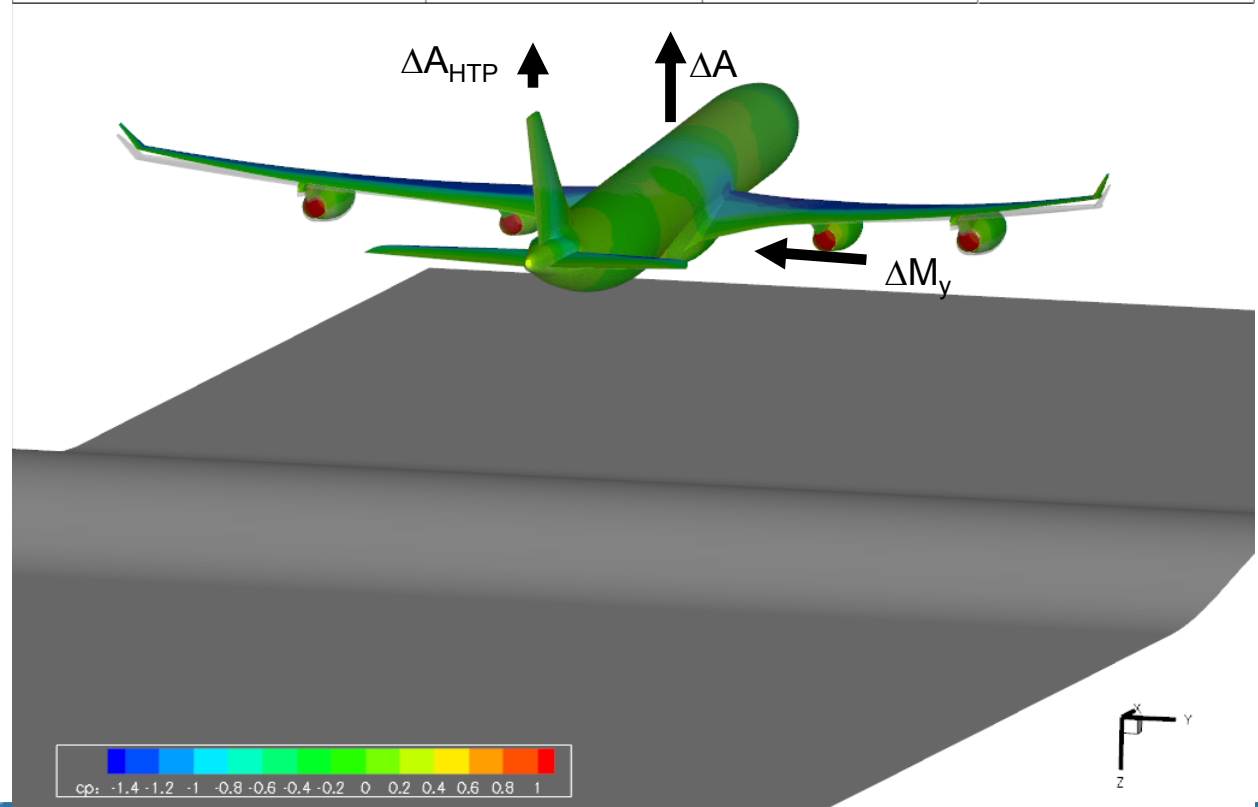
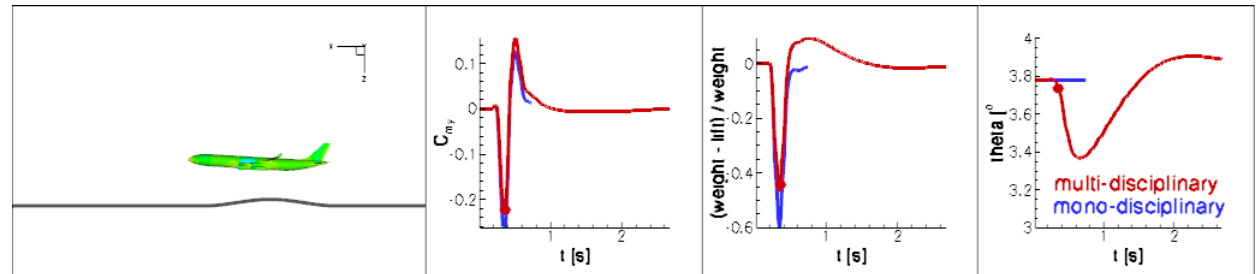
- A340-300 (AWIATOR)
- $Ma = 0.82$
- $Re = 35.3 \times 10^6$
- Gew. = 195 to
- $\lambda_{gust} = 60m$
- $v_{gust} = 15m/s$
- Ausgangspunkt: Getrimmter Zustand
- Kopplung zur Flugmechanik
- Berücks. der Elastizität (quasi stationär)
- 192 Prozessor Kerne
- $\Delta t = 0.02s$
- 2.5s Echtzeit in 16 Stunden



Anwendung

Böen-Begegnung einer A340 Reiseflugkonfiguration

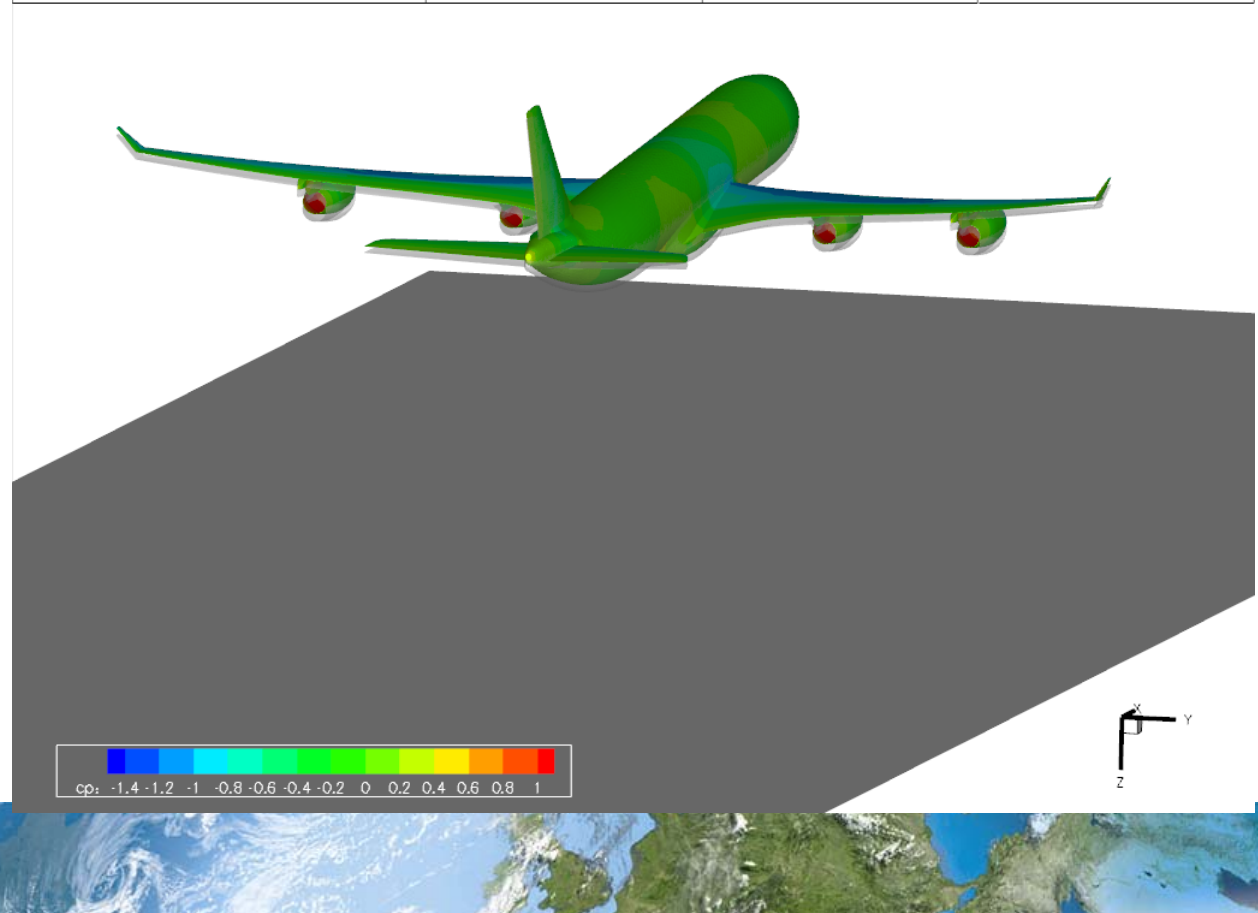
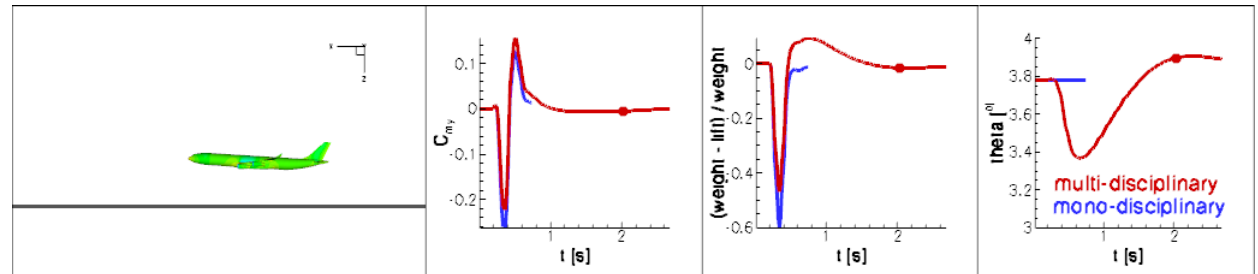
- A340-300 (AWIATOR)
- $Ma = 0.82$
- $Re = 35.3 \times 10^6$
- Gew. = 195 to
- $\lambda_{gust} = 60m$
- $v_{gust} = 15m/s$
- Ausgangspunkt: Getrimmter Zustand
- Kopplung zur Flugmechanik
- Berücks. der Elastizität (quasi stationär)
- 192 Prozessor Kerne
- $\Delta t = 0.02s$
- 2.5s Echtzeit in 16 Stunden

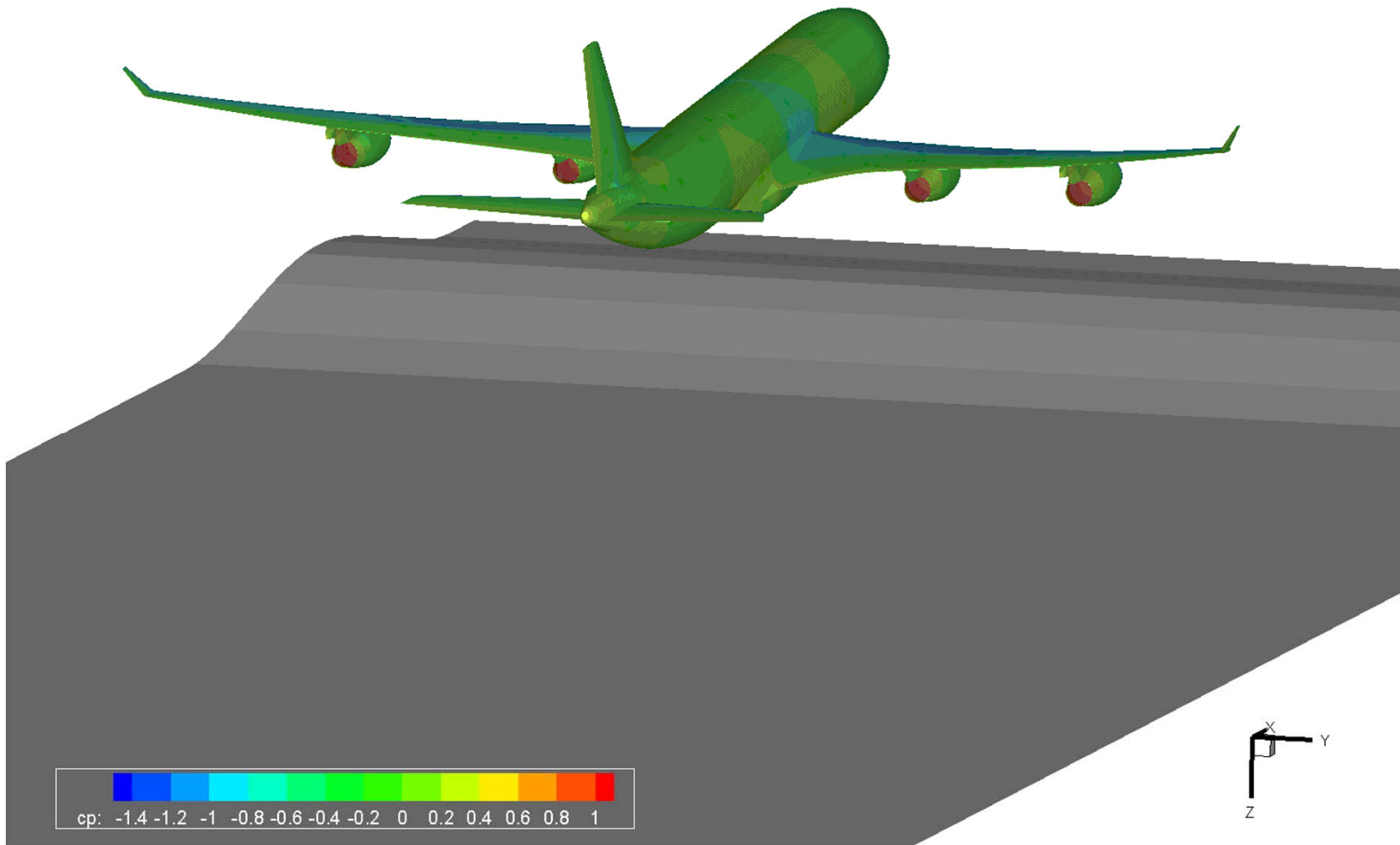
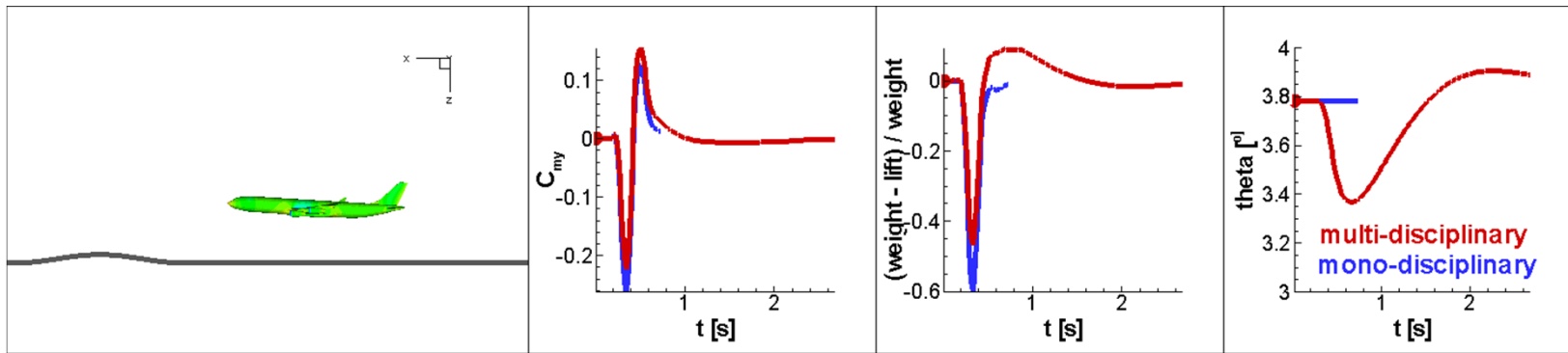


Anwendung

Böen-Begegnung einer A340 Reiseflugkonfiguration

- A340-300 (AWIATOR)
- $Ma = 0.82$
- $Re = 35.3 \times 10^6$
- Gew. = 195 to
- $\lambda_{gust} = 60m$
- $v_{gust} = 15m/s$
- Ausgangspunkt: Getrimmter Zustand
- Kopplung zur Flugmechanik
- Berücks. der Elastizität (quasi stationär)
- 192 Prozessor Kerne
- $\Delta t = 0.02s$
- 2.5s Echtzeit in 16 Stunden





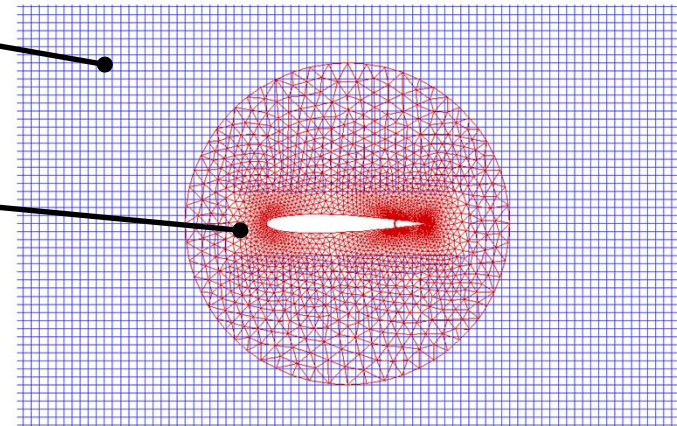
Zusammenfassung

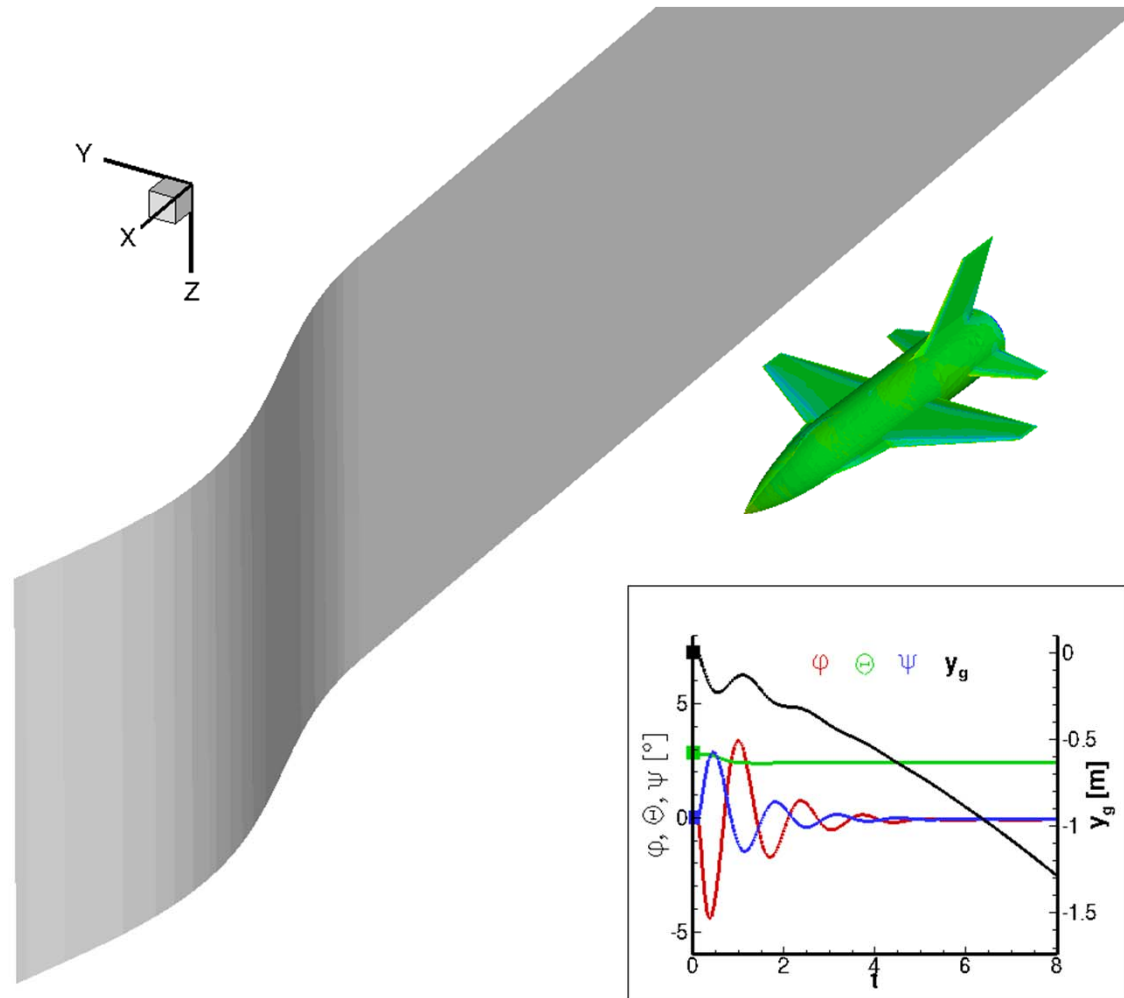
- In TAU sind zwei Methoden zur Modellierung von Böen implementiert worden:
 - Eine vereinfachte Methode: Störgeschwindigkeitsansatz
 - Eine „hoch-genau“ Methode, welche die gegenseitige Wechselwirkung von Flugzeug und Böe ermöglicht
- Der Vergleich zwischen beiden Methoden zeigt, dass
 - der Störgeschwindigkeitsansatz bei $\lambda_{\text{gust}} / c_{\text{ref}} \geq 2.0$ mit dem hochgenauen Ansatz vergleichbare Ergebnisse liefert
 - Abweichungen bei kompressiblen Verhältnissen tendenziell größer als unter inkompressiblen Verhältnissen sind
- Demonstration der Methodik für eine industriell relevante Konfiguration unter Berücksichtigung der Reaktion des Flugzeuges
 - . . . Struktur nur quasi-stationär



Ausblick

- Simulation einer industriell relevanten Konfiguration unter Berücksichtigung der Reaktion des Flugzeuges mit der Böe, voll instationär
 - Im Rahmen des „CFD for loads workshop“, getrieben durch Airbus
 - In enger Kooperation der DLR Institute AS und AE
- Nutzung der Kopplung von TAU mit dem Kartesischem Löser CTAU (FOR1066 und Projekt ALLEGRA)
 - Verwendung des Kartesischen Löser zur Auflösung / Transport der atmosphärischen Störungen
 - Nutzung von TAU in Körpernähe
 - Bessere Berücksichtigung kurzweelligerer Böen oder anderer atmosphärischer Störungen bei deutlich reduzierter Netzauflösung





Schönen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

